

627.8
ALW
E 01



**EFEKTIVITAS BANGUNAN PENANGKAP SEDIMEN
PADA JARINGAN IRIGASI
STUDI KASUS DI BENDUNG PUCANGGADING
(DAERAH IRIGASI PENGGARON KANAN)**

TESIS

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh

Achmad Afir Alwi

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

2004

TESIS

EFEKTIVITAS BANGUNAN PENANGKAP SEDIMEN PADA JARINGAN IRIGASI STUDI KASUS DI BENDUNG PUCANGGADING DAERAH IRIGASI PENGGARON KANAN

Oleh

Achmad Afif Alwi

Disetujui Oleh



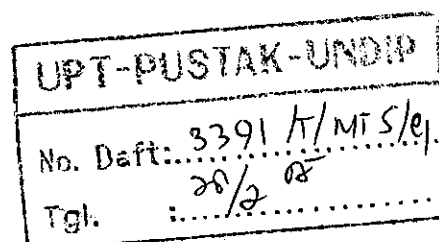
Ir. Pranoto SA, MT
Pembimbing I



Ir. Sri Sangkawati, MS
Pembimbing II

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

2004



**EFEKTIVITAS BANGUNAN PENANGKAP SEDIMEN
PADA JARINGAN IRIGASI
STUDI KASUS DI BENDUNG PUCANGGADING
DAERAH IRIGASI PENGGARON KANAN**

Diajukan oleh

Achmad Afif Alwi

NIM. L4A099003

Dipertahankan di depan Tim Penguji tanggal :

4 September 2004

Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Semarang, September 2004

Universitas Diponegoro
Program Pasca Sarjana
Magister Teknik Sipil

Tim Penguji :

- | | | |
|---------------------------------|--------------|-------|
| 1. Ir. Pranoto SA, MT. | (Ketua) | |
| 2. Ir. Sri Sangkawati, MS. | (Sekretaris) | |
| 3. Dr. Ir. Suripin, M.Eng. | (Anggota 1) | |
| 4. Dr. Ir. RY. Kodoatie, M.Eng. | (Anggota 2) | |
| 5. Dr. Ir. Suharyanto, M.Sc. | (Anggota 3) | |



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Swt, karena dengan rahmat Nya penyusun dapat menyelesaikan tesis dengan judul “Efektifitas Bangunan Penangkap Sedimen pada Jaringan irigasi” yang merupakan studi kasus dan kami lakukan di Daerah Irigasi Penggaron Kanan (Bendung Pucanggading) Kabupaten Demak.

Tesis ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa untuk mencapai derajat sarjana S-2 Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro.

Pada kesempatan ini penyusun mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ketua Program Magister Teknik sipil Universitas Diponegoro, serta Pimpinan dan staf Balai PSDA Jragung-Tuntang yang telah banyak membantu dan memberi fasilitas dalam berbagai hal, khususnya menyangkut administrasi dan pelaksanaan penelitian ini.

Terima kasih juga kami sampaikan kepada Ir. Pranoto SA, MT dan Ir. Sri Sangkawati, MS selaku Pembimbing sekaligus Ketua dan Sekretaris tim penguji yang banyak sekali memberi masukan dan koreksi tentang teori hidrolika, sedimentasi dan kajian efisiensi serta metodologi dan penyusunan tesis ini.

Kepada para anggota tim penguji yang terdiri dari Dr. Ir. Suripin, M.Eng., yang telah memberi arahan tentang kajian efisiensi dan Dr. Ir. Robert Y. Kodoatie, M.Eng., yang banyak memberi masukan mengenai teori dasar sedimentasi dan penerapannya serta Dr. Ir. Suharyanto MSc., yang banyak memberi koreksi terhadap kajian dasar efisiensi maupun sedimentasi kami ucapkan juga terima kasih.

Tak lupa kami ucapkan terima kasih kepada para Dosen yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan keilmuan yang mendasar dengan penuh kesabaran, serta semua Staf Program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro yang selalu setia membantu dalam menyiapkan setiap program yang ada.

Penyusun juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh rekan seperjuangan yang telah memberikan bantuan dan dorongan semangat sehingga tesis ini dapat diselesaikan. Semoga semua yang telah kita perbuat dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang teknik sumber daya air.

Semarang, September 2004

Penyusun,

A. Afif Alwi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xi
ABSTRACT	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian	3
1.3. Lingkup Penelitian	3
1.4. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Umum	7
2.2. Angkutan Sedimen	8
2.2.1. Perhitungan Angkutan sedimen Total	10
2.2.2. Pengukuran Angkutan sedimen	12
2.2.3. Pengukuran Aliran	14
2.3. Formulasi Pengendapan sedimen	14
2.4. Efisiensi Pengendapan sedimen	16
2.5. Pendekatan Statistik	19
2.5.1. Analisis Regresi	19
2.5.2. Analisis Korelasi	23
2.6. Kriteria Perencanaan	24
BAB III METODA PENELITIAN	
3.1. Tahapan Penelitian	29
3.2. Alat untuk Penelitian	33

3.3. Pengumpulan Data	33
3.3.1. Lokasi Pengambilan Contoh ("Sample")	34
3.3.2. Kondisi pengukuran dan Pengambilan Contoh Sedimen	34
3.3.3. Pengukuran Muka Air	37
3.3.4. Pengukuran Kecepatan Aliran dan debit	37
3.3.5. Pengukuran Penampang Melintang Bangunan	37
3.3.6. Perhitungan Angkutan sedimen	37
3.3.7. Gradasi Butiran	38
3.4. Perhitungan Angkutan Sedimen	39
3.5. Efisiensi Pengendapan Sedimen	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.2. Hasil Penelitian	41
4.1.1. Tinjauan Obyek Penelitian	41
4.1.2. Parameter Pengendapan Sedimen di Bangunan Penangkap Sedimen	42
4.1.3. Pengukuran Kecepatan	43
4.1.4. Perhitungan Debit	43
4.1.5. Gradasi Butiran Sedimen	46
4.1.6. Pengukuran Angkutan Sedimen	47
4.1.7. Perhitungan Angkutan Sedimen	49
4.1.8. Modifikasi Rumus Ackers dan White	50
4.1.9. Efisiensi Pengendapan Sedimen	55
4.1.10. Formulasi Empirik Pengendapan Sedimen di BPS	61
4.1.11. Validasi Hasil Formulasi Empirik	62
4.2. Pembahasan	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	71
5.2. Saran	73

DAFTAR PUSTAKA	75
-----------------------	-----------

LAMPIRAN A

Lampiran A.1. Hasil uji laboratorium konsentrasi sedimen (C)	78
---	----

Lampiran A.2. Berat sedimen dasar (w) yang tertangkap alat ukur Helley Smith	83
LAMPIRAN B	
Lampiran B.1. Hasil uji laboratorium berat jenis spesifik (Gs)	84
Lampiran B.2. Hasil uji laboratorium Gradasi butiran sedimen	87
LAMPIRAN C	
Hasil pengukuran kecepatan arus dan perhitungan debit	155
LAMPIRAN D	
Analisis statistik model regresi berpangkat berganda (non-linier)	184
LAMPIRAN E	
Foto dokumentasi pelaksanaan penelitian	186

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1a. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hulu BPS pada kondisi debit disain	44
Tabel 4.1b. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di BPS pada kondisi debit disain	44
Tabel 4.1c. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hilir BPS pada kondisi debit disain	45
Tabel 4.1d. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hulu BPS pada kondisi debit bervariasi	45
Tabel 4.1e. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di BPS pada kondisi debit bervariasi	45
Tabel 4.1f. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hilir BPS pada kondisi debit bervariasi	46
Tabel 4.2a. Angkutan sedimen total yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit disain	48
Tabel 4.2b. Angkutan sedimen total yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit disain	48
Tabel 4.2c. Angkutan sedimen total yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi	49
Tabel 4.2d. Angkutan sedimen total yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi	49
Tabel 4.3. Perhitungan angkutan sedimen total Metode "Ackers dan White"	52
Tabel 4.4. Analisis optimasi non-linier untuk modifikasi Rumus "Ackers dan White"	53
Tabel 4.5. Discrepancy ratio (RD) dan koefisien korelasi (Cc) antara Qs pengukuran dan Qs perhitungan	54
Tabel 4.6a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan Rumus "Ackers dan White Modifikasi" pada debit bervariasi	57

Tabel 4.6b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan- Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada debit bervariasi	57
Tabel 4.7a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan- Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada debit disain	58
Tabel 4.7b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan- Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada kondisi debit disain	59
Tabel 4.8. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode- Sedimentasi (Ackers dan White) pada kondisi debit bervariasi	59
Tabel 4.9. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran pada kondisi debit disain	59
Tabel 4.10. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode- Sedimentasi (Ackers dan White) pada kondisi debit disain	59
Tabel 4.11. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Camp pada kondisi debit disain	60
Tabel 4.12. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Vetter pada kondisi debit disain	60
Tabel 4.13. Perhitungan efisiensi dengan persamaan hasil formulasi empirik pada kondisi debit disain	63
Tabel 4.14. Perbandingan nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran dan perhitungan dengan formulasi empirik, Grafik Camp dan Rumus Vetter	63
Tabel 4.15. Hubungan antara Efisiensi (metode Formulasi Empirik) dengan beberapa parameter aliran dan sedimen	66
Tabel 4.16. Parameter untuk perhitungan efisiensi pengendapan sedimen metode Camp	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Lokasi Penelitian	6
Gambar 2.1. Klasifikasi angkutan sedimen di saluran (sungai)	9
Gambar 2.2. Skematik pengendapan sedimen di BPS	15
Gambar 2.3. Hubungan antara diameter saringan dan kecepatan pengendapan untuk Air Tenang (Grafik Shields)	18
Gambar 2.4. Grafik pembuangan sedimen Camp untuk aliran turbulensi (1945)	18
Gambar 3.1. Kondisi Bangunan Penangkap Sedimen tempat Penelitian	31
Gambar 3.2. Bagan alir tahapan pelaksanaan Penelitian	32
Gambar 4.1. Korelasi angkutan sedimen total hasil perhitungan dengan hasil – pengukuran menggunakan Rumus Ackers dan White dan Modifikasi- Ackers dan White	54
Gambar 4.2. Perbandingan nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil - pengukuran dan perhitungan dengan beberapa metode (<i>barchart</i>)	63
Gambar 4.3. Perbandingan nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil – pengukuran dan perhitungan dengan beberapa metode (grafik)	63
Gambar 4.4. Grafik hubungan antara Efisiensi (metode Formulasi Empirik) dengan beberapa parameter aliran dan sedimen	66

DAFTAR NOTASI

- A = luas penampang aliran
- a = koefisien yang dicari untuk modifikasi Rumus Ackers dan White
- b, c, d = koefisien pangkat dari kedalaman aliran, kecepatan dan diameter sedimen untuk modifikasi rumus Ackers dan White
- B = lebar bangunan penangkap sedimen
- C = konsentrasi sedimen
- $C_{AW1}, C_{AW2}, C_{AW3}, C_{AW4}, C_{AW5}$
= koefisien-koefisien perhitungan dalam Rumus Ackers dan White
- Cc = koefisien korelasi
- Cw = konsentrasi berat sedimen total dalam rumus Ackers dan White
- Cppm = konsentrasi sedimen total dalam ppm
- Cmg/l = konsentrasi sedimen total dalam mg/l
- ΔQ_s = jumlah sedimen yang diendapkan di BPS
- ds = diameter butiran sedimen ($=d_{50}$)
- d* = diameter gradasi tak berdimensi
- e = efisiensi alat ukur muatan sedimen dasar jenis Helley Smith
- Ep = efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen
- Gs = *specific gravity*
- g = percepatan gravitasi bumi
- h = tinggi aliran air
- Ke = koefisien empirik
- L = panjang bangunan penangkap sedimen
- L_T = muatan sedimen total
- L_b = muatan dasar yang didefinisikan sebagai partikel sedimen yang selalu bersentuhan dengan dasar saluran
- L_s = muatan layang yang didefinisikan sebagai sedimen layang yang melewati penampang lintang saluran diatas lapisan dasar.

L_m	= sedimen yang terukur
L_u	= sedimen tidak terukur yang merupakan penjumlahan antara muatan dasar dan sebagian muatan layang dibawah elevasi pengukuran terendah.
L_w	= muatan cuci yang didefinisikan sebagai partikel halus yang tidak ditemukan pada material dasar ($d_s < d_{10}$) dan berasal dari tebing dan lereng diatasnya.
L_{bm}	= batas kapasitas muatan dasar
n	= jumlah putaran kincir alat ukur kecepatan (<i>current meter</i>)
Q	= debit aliran
Q_s	= debit angkutan sedimen
Q_i	= angkutan sedimen masuk ke bangunan penangkap sedimen
Q_o	= angkutan sedimen keluar dari bangunan penangkap sedimen
q_b	= angkutan sedimen dasar per satuan lebar
R_D	= <i>discrepancy ratio</i>
s	= kemiringan dasar/aliran
T	= jumlah angkutan sedimen
t	= waktu (periode)
V	= kecepatan aliran air
V_o	= kecepatan aliran rata-rata dalam BPS
V_p	= volume pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen
ν	= viskositas
w	= berat sedimen dasar yang tertangkap alat ukur Helley Smith
ω	= kecepatan endap partikel sedimen
ω_o	= kecepatan endap partikel sedimen rancangan

ABSTRACT

For preventing the excessive sedimentation in irrigation system, it requires a sedimentation basin. The basin has a certain dimension so that it be able to trap sediment economically by knowing the trap efficiency.

Construction of the sedimentation basin spends high cost, often has less effective function. More maintenance cost is needed to overcome the sedimentation that still happened in the irrigation channel.

This study discusses and evaluates trap efficiency of the existing sedimentation basin. Through the computation and measurement of hydraulic geometry, sediment characteristics, sediment inflow and outflow around sedimentation basin the trap efficiency rate could be estimated. Decreasing efficiency may reduce the effectively of sedimentation basin.

A total of 40 measurement data of hydraulic geometries and 38 laboratories test of sediment material where conducted. Using empirical equation, Camp Graph, Vetter equation and Modification of Ackers and White's sediment transport equation, 16 data sets were analysed to obtain trap efficiency rate.

Based on the result of present study, it is found that the trap efficiency of sedimentation basin is less than the design rate. Trap efficiency determined based on the Camp Graph method by using the design data and the measured data are 68,00 % and 52,00 % respectively. According to the Sedimentation method, Vetter and empirical equation by using this study data, the values are 47,51 %, 42,43 % and 48,40 % respectively. It is concluded that the existing sedimentation basin is ineffective. The effectively may be improved by modifying the operation manual of sedimentation basin.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengambilan air irigasi dari suatu sungai selalu diikuti dengan angkutan sedimen. Material sedimen tersebut akan terangkut dan mengendap di saluran irigasi serta sebagian lainnya akan masuk dan mengendap di areal persawahan. Pada tingkat dan besaran tertentu endapan sedimen ini sangat tidak menguntungkan bagi keperluan pengaliran air di saluran irigasi, seperti dinyatakan oleh Heinemann dalam Soekarno (1998) bahwa sedimentasi menyebabkan pengendapan di saluran irigasi, mengurangi kapasitas saluran dan lebih sedikit sawah yang dapat terairi. Lebih merugikan lagi jika material sedimen yang berupa pasir dan fraksi yang lebih besar terangkut dan mengendap di areal persawahan, sehingga mengurangi kualitas kesuburan tanah.

Berbagai cara telah diupayakan untuk mengurangi angkutan sedimen yang merugikan ke dalam saluran irigasi. Salah satunya yang umum dibuat adalah pembuatan bangunan penangkap sedimen (*sedimentation basin*). Meski demikian, sedimentasi di jaringan irigasi masih tetap saja terjadi dalam jumlah yang cukup besar. Sehingga dalam kenyataannya diperlukan biaya operasi dan pemeliharaan yang besar pula untuk pengerukan sedimen ini.

Salah satu parameter untuk mengetahui efektivitas bangunan penangkap sedimen (BPS) dalam mengendapkan sedimen adalah mengetahui nilai efisiensi pengendapan sedimen di bangunan tersebut.

UPT-PUSTAK-UNDIP

Efisiensi pengendapan sedimen menurut Strand dan Pemberton (1982) didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah sedimen yang terendap dengan jumlah seluruh angkutan sedimen.

Efisiensi pengendapan sedimen di BPS sangat dipengaruhi oleh panjang bangunan tersebut. Semakin panjang bangunan maka semakin besar tingkat efisiensinya, tetapi ukuran bangunan yang terlalu panjang dapat mengurangi efektivitasnya.

Mengingat pentingnya masalah efektivitas BPS, terutama bila dikaitkan dengan fungsi dan kelayakan pembuatan BPS yang menghabiskan biaya cukup mahal serta adanya manfaat yang sangat penting untuk kegiatan operasi dan pemeliharaan pada jaringan irigasi, maka perlu perhatian khusus terhadap masalah ini, antara lain berupa penelitian.

Daerah Irigasi Penggaron Kanan (Bendung Pucanggading) yang menjadi obyek dalam penelitian ini meskipun sudah dilengkapi dengan BPS tetapi masih mempunyai masalah yang terjadi secara rutin yaitu, sedimentasi di saluran irigasi. Sedimentasi tersebut mengakibatkan penurunan kapasitas saluran pada jaringan irigasi utamanya, terutama di saluran induk dan sekundernya. Kapasitas pengaliran saluran yang semula dirancang $3,227 \text{ m}^3/\text{det.}$, pada saat ini hanya mampu mengalirkan debit sebesar $1,00 \text{ m}^3/\text{det.}$ Kondisi ini tentu sangat merugikan, tetapi untuk mengembalikan kapasitas saluran seperti semula dengan cara pengerukan diperlukan biaya yang cukup besar dan dikeluarkan secara rutin. Adanya kasus ini menimbulkan pertanyaan tentang efektivitas BPS yang ada, sehingga perlu dilakukan penelitian tentang efektivitas BPS terhadap fungsi pengendapan sedimennya.

BPS pada Daerah Irigasi Penggaron Kanan (Bendung Pucanggading) yang dijadikan studi kasus dalam penelitian ini mengambil air dari Sungai Babon melalui bangunan pengambilan yang berlokasi di Kecamatan Pucanggading, Kabupaten Demak. Lokasi obyek penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 1-1. Lokasi Penelitian.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dilakukannya penelitian ini adalah mengetahui efektivitas BPS untuk mengendapkan sedimen yang akan masuk ke dalam jaringan irigasi.

Tujuan penelitian adalah menghitung nilai efisiensi pengendapan sedimen yang digunakan sebagai tolok ukur untuk mengetahui efektivitas BPS pada jaringan irigasi. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen tersebut dilakukan dengan menggunakan data geometri aliran (hidrolika) dan karakteristik sedimen hasil pengukuran secara langsung di lapangan serta hasil analisis di laboratorium.

1.3. Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian ini mencakup pengukuran dan perhitungan angkutan sedimen menggunakan metode Ackers dan White yang dimodifikasi dengan menggunakan data hasil pengukuran secara langsung di lapangan. Data lapangan yang diambil pada bagian masuk, keluar dan pada bangunan penangkap sedimen (BPS) mencakup data geometri aliran (kecepatan, tinggi, penampang basah dan debit), serta karakteristik sedimen (konsentrasi, gradasi, *specific gravity*) yang digunakan sebagai variabel dalam perhitungan dan analisis untuk mengetahui nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS tersebut.

Perhitungan efisiensi dilakukan dengan menggunakan metode sedimentasi (sedimentologi), rumus Vetter dan Grafik Camp (1945) sesuai dengan standar yang digunakan dalam perencanaan BPS (obyek penelitian) ini.

Dalam penelitian ini dilakukan *running* debit aliran dengan 2 kondisi yaitu, kondisi debit bervariasi dan debit rancangan (disain). Data pada kondisi debit bervariasi digunakan untuk membuat formulasi secara empirik nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS, sedangkan data pada kondisi debit rancangan digunakan untuk validasi terhadap formula atau persamaan yang telah dibuat. Validasi dilakukan melalui rumus-rumus yang telah ada seperti disebutkan diatas.

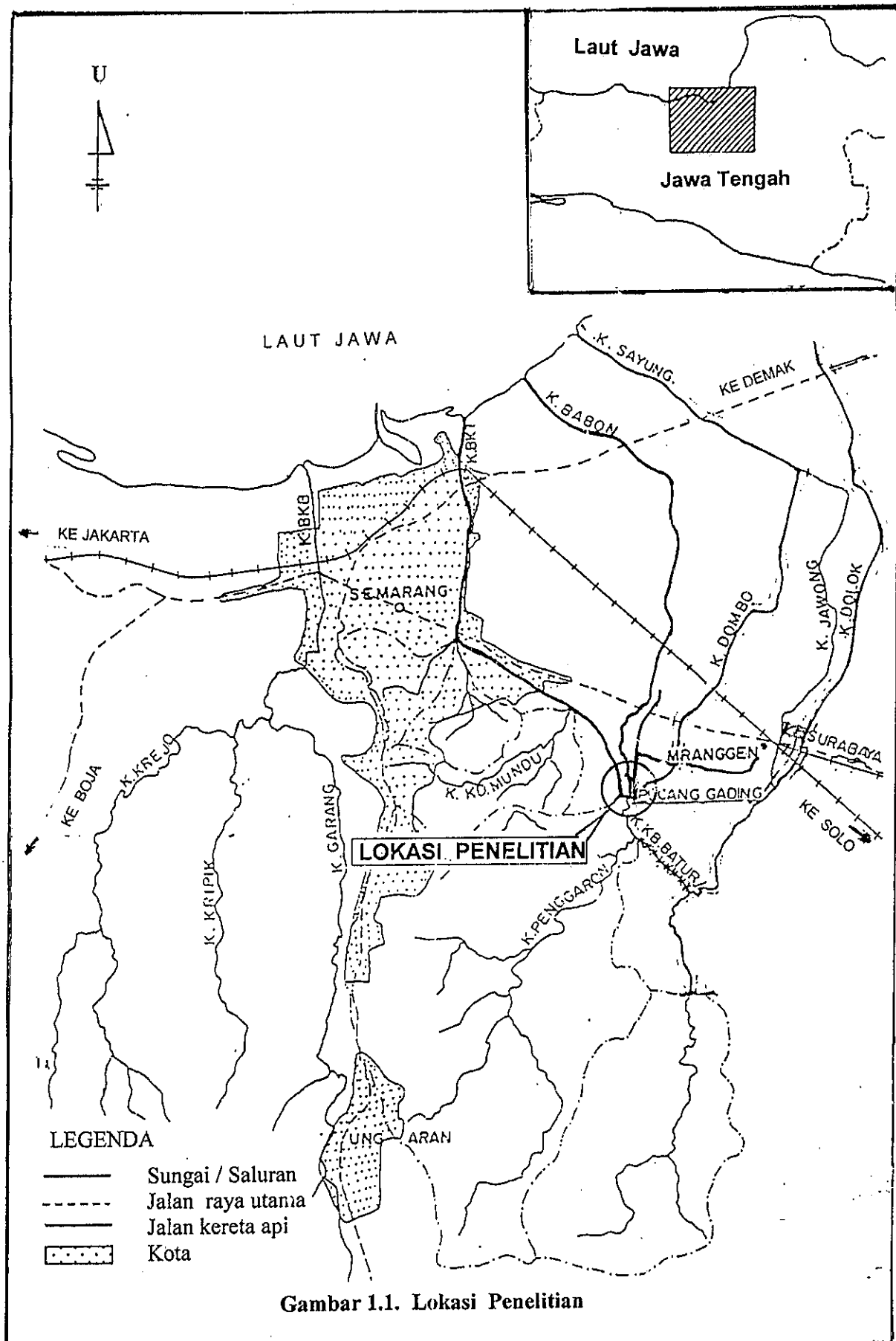
1.4. Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan tesis ini dibagi menjadi lima (5) bab. Bab I yang merupakan pendahuluan dari tesis ini berisi tentang latar belakang, maksud dan tujuan penelitian, lingkup penelitian serta sistematika penulisannya. Bab II terdiri dari kajian secara menyeluruh terhadap pustaka yang terkait dengan teori-teori yang digunakan dalam pembahasan tesis ini.

Bab III menguraikan secara rinci metode dan semua tahapan yang dilakukan dalam penelitian, peralatan yang digunakan, data yang dibutuhkan, pelaksanaan seluruh kegiatan penelitian serta cara analisis atau pengolahan datanya.

Bab IV memuat semua data yang diperoleh dari hasil pengukuran hingga hasil pengolahannya yang berupa perhitungan-perhitungan yang meliputi angkutan sedimen secara empiris, modifikasi persamaan berdasarkan data hasil pengukuran di lapangan hingga perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan menggunakan beberapa metode.

Bab V berisi kesimpulan yang memuat hasil-hasil penting penelitian yang diperoleh berdasarkan analisis dan pembahasan pada bab-bab sebelumnya. Diuraikan juga dalam bab ini saran-saran yang diperlukan untuk penyempurnaan hasil penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

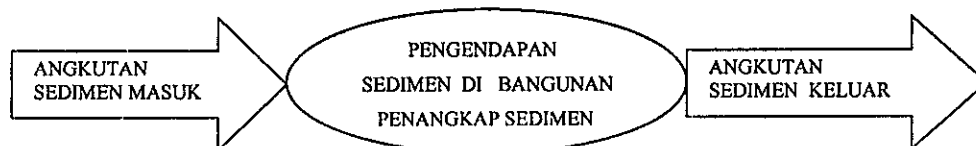
2.1. Umum

Bangunan penangkap sedimen (BPS) merupakan pembesaran secara melintang suatu saluran dengan panjang tertentu untuk mengurangi kecepatan aliran dan memberi kesempatan kepada sedimen untuk mengendap.

Pengendapan sedimen pada intinya dipengaruhi oleh kecepatan jatuh partikel sedimen dan kecepatan aliran air. Kecepatan jatuh partikel tersebut tergantung pada ukuran, bentuk, berat jenis partikel, serta kondisi air terutama kekentalannya (Soekarno, 1998). Sedangkan kecepatan aliran tergantung pada penampang dan kemiringan salurannya. Volume tampungan yang harus disediakan dalam suatu bangunan penangkap sedimen tergantung pada banyaknya sedimen yang akan diendapkan dalam periode waktu yang ditetapkan.

Efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen didefinisikan dengan perbandingan antara sedimen yang mengendap dengan jumlah sedimen yang masuk kedalam bangunan tersebut dalam periode waktu tertentu. Banyaknya sedimen yang mengendap merupakan selisih antara jumlah angkutan sedimen yang masuk dengan jumlah angkutan sedimen yang keluar dari bangunan penangkap sedimen.

Secara skematis konsep dasar perhitungan efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen dapat digambarkan dengan bagan seperti berikut.



2.2. Angkutan sedimen

Mekanisme angkutan sedimen dalam aliran air menurut Venoni (1977) dibedakan menjadi dua (2) bagian, yaitu material dasar (*bed load*) dan sedimen layang (*suspended load*). Angkutan sedimen dasar adalah angkutan sedimen dengan gerakan partikel yang selalu bergerak dan berada dekat dengan dasar sungai dengan cara menggelinding, menggelincir dan meloncat. Sedimen layang adalah angkutan sedimen dengan gerakan partikel selalu ikut bersamaan dengan aliran air. Pengendapan partikel sedimen cenderung secara berkelanjutan dengan gerakan *diffusive* pada bidang aliran turbulensi.

Banyak sekali rumus (persamaan) untuk menghitung angkutan sedimen. Tetapi tidak ada satu rumuspun yang dapat diaplikasikan secara umum untuk semua kondisi (Kodoatie, 2000). Oleh karena itu hasil perhitungan dengan rumus yang ada harus dilakukan pengecekan dengan data hasil pengukuran langsung di lapangan. Hasil pengecekan dengan data lapangan ini menghasilkan rumus modifikasi yang paling cocok diterapkan pada sungai atau saluran tersebut.

Menurut Julien (1995), muatan sedimen total dapat dibagi menjadi tiga persamaan yaitu :

1. Berdasarkan jenis gerakan

$$L_T = L_b + L_s \quad (2.1a)$$

2. Berdasarkan metode pengukurannya

$$L_T = L_m + L_u \quad (2.1b)$$

3. Berdasarkan sumber sedimen

$$L_T = L_w + L_{bm} \quad (2.1c)$$

dimana :

L_T = muatan sedimen total

L_b = muatan dasar yang didefinisikan sebagai partikel sedimen yang selalu bersentuhan dengan dasar saluran

L_s = muatan layang yang didefinisikan sebagai sedimen layang yang melewati penampang lintang saluran diatas lapisan dasar.

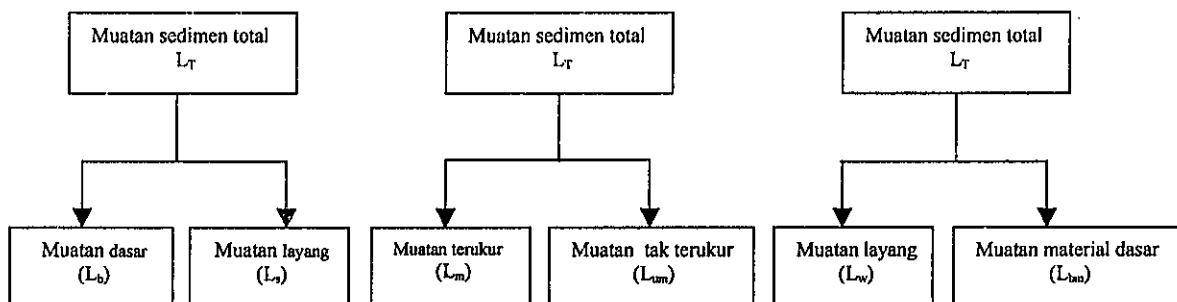
L_m = sedimen yang terukur

L_{um} = sedimen tidak terukur yang merupakan penjumlahan antara muatan dasar dan sebagian muatan layang dibawah elevasi pengukuran terendah.

L_w = muatan kikisan (*washed load*) yang didefinisikan sebagai partikel halus yang tidak ditemukan pada material dasar ($d_s < d_{10}$) dan berasal dari tebing dan lereng diatasnya.

L_{bm} = batas kapasitas muatan dasar

Secara skematis pembagian muatan sedimen dapat diuraikan sebagai berikut :



Gambar 2.1. Klasifikasi angkutan sedimen di saluran (sungai)

2.2.1. Perhitungan Angkutan Sedimen Total

Metode yang digunakan dalam perhitungan muatan sedimen total ini dikembangkan oleh Ackers pada tahun 1972 dan disempurnakan oleh Ackers dan White pada tahun 1973. Persamaan ini telah diuji di laboratorium dengan menggunakan *flume* dan hasilnya telah dibandingkan dengan data lapangan.

Gerakan sedimen dalam metode ini dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Julien, 1995) :

$$C_{AWS} = \frac{u_* C_{AW1}}{\sqrt{(G-1)gd_s}} \left[\frac{u}{\sqrt{32 \log(10 d/d_s)}} \right]^{1-C_{AW1}} \quad (2.2)$$

dimana :

C_{AWS} = parameter gerakan sedimen

u_* = Kecepatan geser, m/det.

u = kecepatan aliran, m/det.

d_s = diameter butiran sedimen (d_{50}), mm.

D = kedalaman aliran, m.

G = *specific gravity*

C_{AW1} = koefisien

Nilai C_{AW1} tergantung kepada ukuran sedimen. C_{AW1} mempunyai nilai nol bila material sedimennya kasar (*coarse*) dan mempunyai nilai (harga) bila material sedimennya halus.

Parameter diameter partikel tak berdimensi diperoleh dengan mengeliminasi tegangan geser dari dua parameter Shields; atau dari koefisien penahan dan angka Reynolds dari pengendapan partikel dengan eliminasi kecepatan pengendapan; atau berdimensi, dengan berat terbenam dari gradasi

individu, kerapatan zat cair, dan viskositas sebagai variabel (Ackers dan White, 1973 dan 1980). Oleh karena itu variabel tersebut cocok untuk sedimen kasar, transisi, dan halus. Parameter diameter partikel tak berdimensi d_* dinyatakan sebagai berikut :

$$d_* = \left[\frac{(G-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} d_s \quad (2.3)$$

dimana :

ν = viskositas kinematik, $m^2/det.$

Sehingga konsentrasi berat sedimen total dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_w = C_{AW2} G \frac{d_s}{d} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} \quad (2.4)$$

dimana :

C_w = konsentrasi sedimen dalam berat, ppm

d_* = parameter diameter partikel tak berdimensi

C_{AW1} , C_{AW2} , C_{AW3} , dan C_{AW4} = koefisien yang nilainya tergantung pada diameter partikel tak berdimensi d_* .

Harga untuk C_{AW1} , C_{AW2} , C_{AW3} , dan C_{AW4} diperoleh melalui data saluran (*flume*) di laboratorium untuk ukuran partikel antara 0,04 mm sampai dengan 4,0 mm sebagai berikut (Julien, 1995) :

Untuk $1,0 < d_* < 60,0$

$$C_{AW1} = 1,0 - 0,56 \log d_* \quad (2.5)$$

$$\log C_{AW2} = 2,86 \log d_* - (\log d_*)^2 - 3,53 \quad (2.6)$$

$$C_{AW3} = \frac{0,23}{d_*^{1/2}} + 0,14 \quad (2.7)$$

$$C_{AW4} = \frac{9,66}{d_*} + 1,34 \quad (2.8)$$

Untuk $d_* > 60,0$ diperoleh harga-harga sebagai berikut :

$$C_{AW1} = 0, \quad C_{AW2} = 0,025, \quad C_{AW3} = 0,17, \quad C_{AW4} = 1,50 \quad (2.9)$$

Awal gerak dimulai bila $C_{AW3} = C_{AW5}$. Dengan demikian kondisi ini cocok dengan kriteria Shields untuk sedimen kasar, sedangkan untuk material halus, ini diberikan diantara Shields dan White (Julien, 1995). Untuk gerakan pasir halus dan sangat halus, metode ini cenderung menghasilkan perkiraan yang lebih besar konsentrasinya.

2.2.2. Pengukuran Angkutan Sedimen

1. Angkutan Muatan Sedimen Dasar

Pengukuran angkutan sedimen pada suatu titik (penampang sungai) tertentu dapat diukur secara langsung di lapangan dengan menggunakan peralatan standar. Pengukuran muatan sedimen dasar cara langsung adalah metode mengukur muatan sedimen dasar dengan cara mengambil sampel secara langsung dari sungai (lokasi pengukuran) dengan menggunakan alat ukur muatan sedimen dasar (Soewarno, 1991). Untuk mengetahui angkutan muatan sedimen dasar (bed load) dapat digunakan dengan alat jenis "Helley-Smith Bed-Load Sampler" (WMO, 1989). Metoda pelaksanaan pengukuran angkutan sedimen dasar ini dilakukan dengan meletakkan alat ukur tersebut di dasar saluran dengan periode waktu yang tertentu.

Adapun nilai angkutan sedimen dasar tersebut dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$q_b = \frac{100 \cdot w}{e \cdot b \cdot t} \quad (2.10)$$

dimana :

q_b = angkutan sedimen dasar ($m^3/det/m'$)

w = berat sedimen dasar yang tertangkap alat ukur muatan sedimen dasar selama periode waktu t (g)

b = lebar mulut/lubang alat ukur muatan sedimen dasar (m)

t = waktu/periode pengukuran (det)

e = efisiensi alat ukur muatan sedimen dasar (%)

2. Angkutan Sedimen Layang

Untuk mengetahui angkutan sedimen layang (suspended load) dilakukan dengan cara mengukur konsentrasi sedimen dalam aliran air. Dalam penelitian ini, contoh (*sample*) sedimen layang diambil dengan menggunakan peralatan yang berupa botol “sampler” jenis USDH 48 (Travaglio, 1981). Contoh tersebut kemudian dianalisis di laboratorium untuk memperoleh nilai konsentrasi sedimen (C).

Angkutan sedimen layang ini dihitung dengan cara mengalikan konsentrasi sedimen (C) dengan debit aliran airnya, yang dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$Q_s = Q \cdot C \quad (2.11)$$

dimana :

Q_s = debit angkutan sedimen (kg/det)

Q = debit aliran air (m^3/det)

C = konsentrasi sedimen layang (g/l)

2.2.3. Pengukuran Aliran

Pengukuran aliran mencakup pengukuran penampang melintang aliran yang terdiri dari tinggi muka air, lebar dan luas penampang basah, serta pengukuran kecepatan aliran air. Data-data tersebut diukur secara langsung dan merupakan data primer yang akan digunakan untuk perhitungan debit aliran dan angkutan sedimen. Data debit diperoleh berdasarkan perkalian antara luas penampang basah dengan kecepatan aliran hasil pengukuran dengan alat ukur arus yaitu *currentmeter*.

Pengukuran kecepatan aliran dilakukan dengan menggunakan alat ukur arus melalui pembacaan nilai putaran kincir per detik. Kecepatan aliran rata-rata diperoleh dengan cara mengkalibrasi pembacaan putaran kincirnya. Berdasarkan hasil kalibrasi pada alat ukur tersebut dapat dibuat formulasi kecepatan aliran seperti berikut ini :

$$- V = 0,0605 \ n + 0,0176 \text{ m/det.}, \text{ untuk nilai } n < 1,143 \quad (2.12a)$$

$$- V = 0,0583 \ n + 0,0208 \text{ m/det.}, \text{ untuk nilai } 1,143 < n < 3,17 \quad (2.12b)$$

$$- V = 0,0515 \ n + 0,0423 \text{ m/det.}, \text{ untuk } n > 3,17 \quad (2.12c)$$

dimana :

n = jumlah putaran kincir per detik

V = kecepatan arus dalam m/det.

2.3. Formulasi Pengendapan Sedimen

Menurut Vanoni (1977), sedimentasi adalah agregat-agregat partikel yang berkumpul di beberapa tempat yang telah dipindahkan pada jarak tertentu secara lateral maupun vertikal.

Formulasi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen dapat diturunkan dari persamaan waktu pengendapan partikel sedimen untuk mencapai dasar antara arah vertikal dengan arah horizontal. Dengan menggunakan Gambar 2.2. Skematik pengendapan sedimen di BPS dapat dijelaskan dengan perumusan sebagai berikut :

Suatu partikel sedimen di titik A (di permukaan BPS bagian hulu) harus sudah mengendap di titik C (di dasar BPS bagian hilir) pada jarak L dalam waktu t. Pergerakan partikel sedimen tersebut dapat dibagi dalam dua arah yaitu arah H dan arah L (vertikal dan horisontal) sehingga berlaku :

$$\frac{H}{\omega} = \frac{L}{v} \quad (2.13)$$

$$\text{apabila } v = \frac{Q}{H \cdot B} \quad (2.14)$$

$$\text{maka } , L \cdot B = \frac{Q}{\omega} \quad (2.15)$$

dimana;

H = kedalaman aliran di bangunan, m.(bervariasi sesuai dengan kondisi endapan)

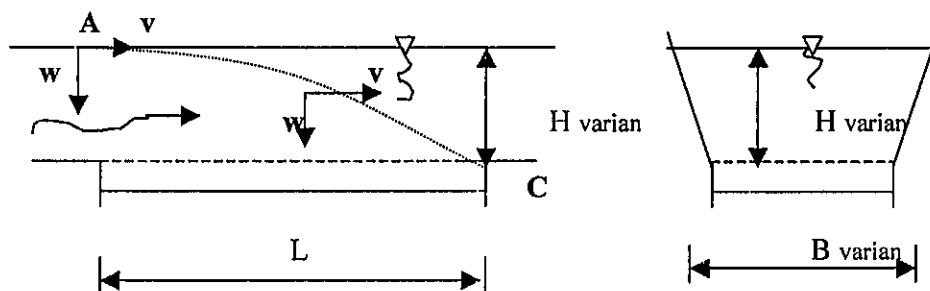
ω = kecepatan endap partikel sedimen, m/det.

L = panjang bangunan penangkap sedimen, m.

v = kecepatan aliran air, m/det.

Q = debit aliran, m³/det

B = lebar bangunan penangkap sedimen, m.



Gambar 2.2. Skematik pengendapan sedimen di BPS

2.4. Efisiensi Pengendapan Sedimen

Ada beberapa metode untuk menentukan efisiensi pengendapan sedimen di bangunan penangkap sedimen (BPS), yaitu dengan cara menggunakan grafik Camp (1945) seperti dilakukan dalam perencanaan BPS di lokasi penelitian ini, rumus Vetter atau dengan cara menghitung perbandingan antara sedimen yang mengendap dengan seluruh angkutan sedimen yang lewat.

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen dengan metode angkutan sedimen merupakan metode perhitungan efisiensi secara langsung di lapangan. Hasil perhitungan ini dapat digunakan untuk analisis formulasi empirik efisiensi pengendapan sedimen di BPS.

Efisiensi pengendapan sedimen dengan menggunakan grafik pengecekan dan perbandingan Camp (1945) merupakan fungsi dari dua (2) parameter, yaitu ω/ω_0 dan ω/ν_0 , dimana :

ω = kecepatan endap partikel yang ukurannya diluar ukuran partikel rancangan, m/det.

ω_0 = kecepatan endap rancangan, m/det.

ν_0 = kecepatan aliran rata-rata dalam BPS, m/det.

Kecepatan pengendapan sedimen dapat diperoleh dengan dua metode, yaitu :

1). Menggunakan Rumus Dasar Pengendapan

Dengan melakukan pengukuran debit dilapangan dan dimasukkan (disubstitusikan) kedalam rumus dasar pengendapan sedimen (persamaan 2.14), maka dapat diperoleh nilai kecepatan endap sedimen (ω) yang terjadi di bangunan penangkap sedimen.

2). Menggunakan Grafik Shields

Metode ini untuk menentukan kecepatan pengendapan sedimen yang berupa partikel-partikel individual (*discrete particles*) dalam air yang tenang. Grafik Shields dan Camp untuk perhitungan efisiensi pengendapan sedimen ini berturut-turut disajikan pada Gambar 2.3. Hubungan antara diameter saringan dan kecepatan pengendapan untuk air tenang (Grafik Shields) dan Gambar 2.4. Grafik pembuangan sedimen Camp untuk aliran turbulensi (Camp, 1945).

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen dengan menggunakan rumus Vetter dilakukan melalui persamaan sebagai berikut :

$$Ep = 1,0 - e^{\left(\frac{-\omega \cdot BL}{Q}\right)} \quad (2.16)$$

dimana;

Ep = Efisiensi pengendapan sedimen (%)

ω = kecepatan pengendapan partikel sedimen (m/det.)

BL = dimensi BPS yang merupakan luas area pengendapan (m^2)

Q = debit aliran ($m^3/det.$)

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen dengan cara menghitung langsung endapan sedimen yang terjadi dilakukan sebagai berikut :

$$Ep = \frac{V_p}{Q_{si} \times t} \quad (2.17)$$

dimana;

Ep = Efisiensi pengendapan sedimen (%)

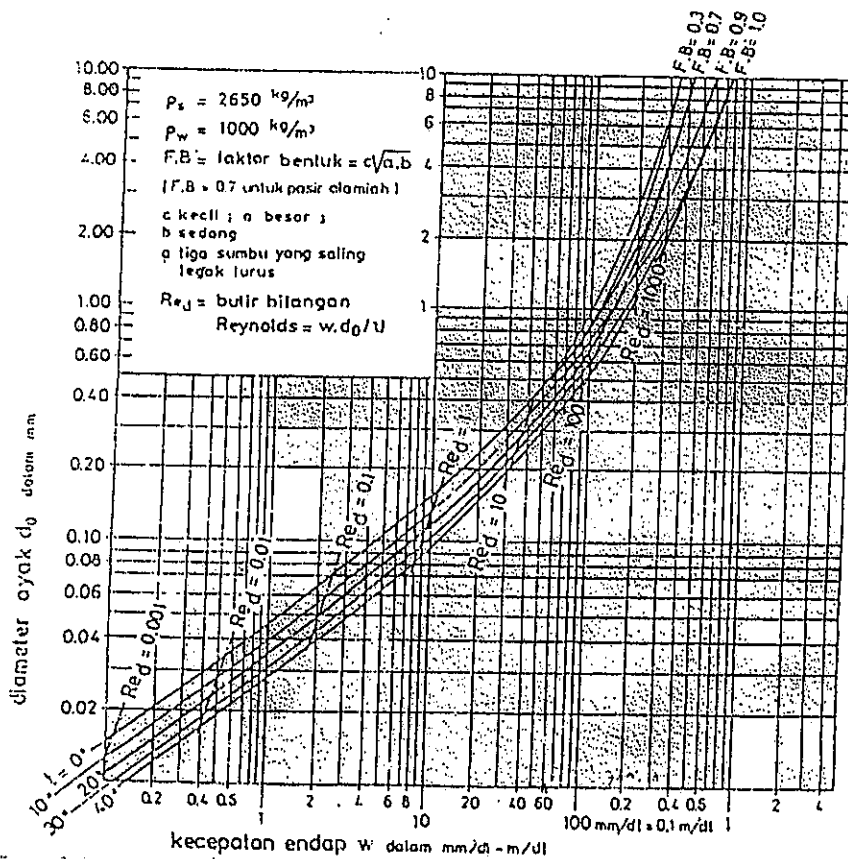
$V_p = (Q_{si} - Q_{so}) \times t$ (2.18)

V_p = volume pengendapan (m^3)

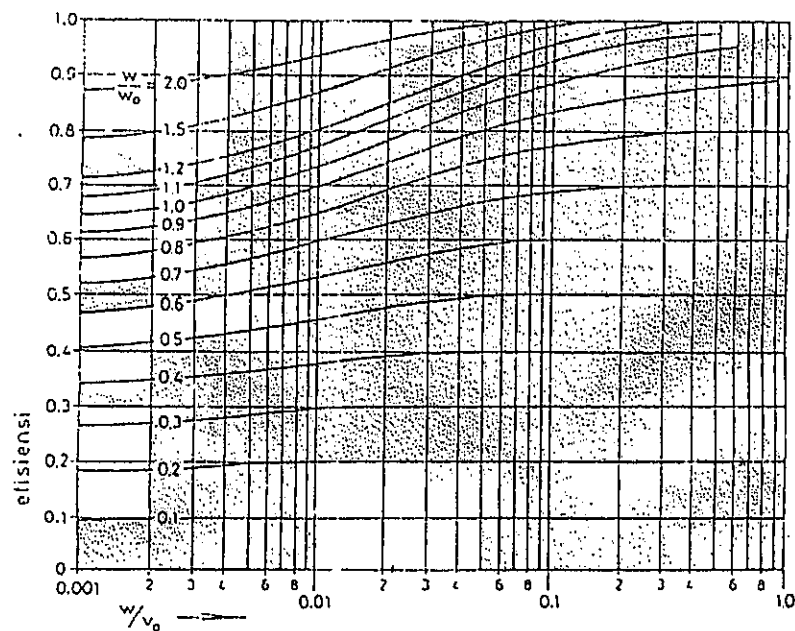
Q_{si} = angkutan sedimen masuk (m^3/dt)

Q_{so} = angkutam sedimen keluar (m^3/dt)

t = periode waktu (det.)



Gambar 2.3. Hubungan antara diameter saringan dan kecepatan pengendapan untuk air tenang (Grafik Shields)



Gambar 2.4. Grafik pembuangan sedimen Camp untuk aliran turbulensi (Camp, 1945).

2.5. Pendekatan Statistik

2.5.1. Analisis Regresi

Untuk menyatakan hubungan dari dua data yang bervariasi dapat dibuat suatu persamaan melalui analisis statistika, yaitu analisis regresi. Ada dua jenis persamaan, masing-masing adalah regresi linear dan non linear.

a) Regresi Linear

Dua variabel yang berpasangan (X_i, Y_i) ; $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$, bila dibuat hubungan maka akan diperoleh suatu garis yang berupa kurva linier sederhana dengan dua model persamaan regresi garis lurus seperti berikut ini :

$$Y = a_1 X + b_1 \quad (2.19)$$

$$X = a_2 Y + b_2 \quad (2.20)$$

Dimana :

X = persamaan garis lurus X atas Y

Y = persamaan garis lurus Y atas X

a_1, a_2 = koefisien arah garis regresi

b_1, b_2 = titik potong garis regresi

Melalui metode kuadrat terkecil, maka nilai koefisien a_1, a_2, b_1 , dan b_2 diatas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.21)$$

$$b_1 = \bar{Y} - a_1 (\bar{X}) \quad (2.22)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2} \quad (2.23)$$

$$b_2 = X - a_2 (Y) \quad (2.24)$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.25)$$

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.26)$$

Sedangkan nilai koefisien korelasi yang menyatakan derajat/tingkat hubungan antara variabel Y_1 dan X_1 adalah sebagai berikut :

$$R = \{(a_1) (a_2)\}^{0,5} \quad (2.27)$$

Nilai korelasi tersebut dapat dihitung dengan rumus seperti berikut :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}} \quad (2.28)$$

Nilai koefisien penentu atau koefisien determinasi (“determination coefisien”), yang menyatakan perbedaan varian dari data pengukuran Y_1 dan varian dari nilai pada garis persamaan regresi untuk nilai X adalah sebagai berikut :

$$R^2 = (a_1)(a_2) \quad (2.29)$$

Sedangkan untuk persamaan regresi Y terhadap X , nilai R^2 dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.30)$$

Nilai residu adalah merupakan ukuran perbedaan antara nilai pengukuran dengan nilai dari persamaan regresi. Deviasi standart dari nilai residu dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \right]^{0,5} \quad (2.31)$$

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{(n-1)} \right]^{0,5} \quad (2.32)$$

Untuk menghitung koefisien regresi a_1 dan a_2 dilakukan dengan menggunakan koefisien korelasi R sebagai berikut :

$$a_1 = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (2.33)$$

$$a_2 = R \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (2.34)$$

Persamaan garis lurus Y pada X, yaitu persamaan untuk meramal Y jika X diketahui menjadi :

$$X = \bar{Y} + Y \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (Y - \bar{Y}) \quad (2.35)$$

Persamaan garis lurus X pada Y, yaitu persamaan untuk meramal X jika Y diketahui menjadi :

$$Y = X + X \frac{\sigma_x}{\sigma_x} (X - X) \quad (2.36)$$

Persamaan garis lurus memerlukan nilai rerata dari variabel Y, X, deviasi standart dari X dan Y serta koefisien korelasi R, sehingga dapat diketahui bahwa :

- 1) Persamaan regresi selalu melalui titik (X, Y)
- 2) Apabila (Xi, Yi) mempunyai koefisien korelasi = 1, maka persamaannya akan berimpit.
- 3) Apabila (Xi, Yi) mempunyai koefisien korelasi = 0, maka persamaannya akan tegak lurus.
- 4) Apabila (Xi, Yi) mempunyai koefisien korelasi yang terletak antara = -1 dan 0 atau 0 dan +1, maka persamaannya akan membentuk sudut tertentu.

b) Regresi Nonlinier

Regresi nonlinier pada umumnya didasarkan pada fungsi (nilai purata) yang diasumsikan nonlinier dengan koefisien-koefisien tak tertentu yang akan dihitung dari data pengamatan. Type fungsi linier yang paling sederhana untuk regresi dari Y atas X adalah sebagai berikut :

$$E(Y|x) = \alpha + \beta f(x) \quad (2.37)$$

Dimana $f(x)$ merupakan fungsi nonlinier dari x yang ditetapkan sebelumnya. Miasalnya, $f(x)$ dapat diambil sebagai $x + x^2$, e^x , $\ln x$ atau fungsi x lainnya. Pada akhirnya analisis regresi nonlinier didasarkan atas asumsi variant $\text{Var}(Y|x)$ yang konstan, atau yang merupakan fungsi dari $f(x)$.

Dengan mendefinisikan variabel baru $x' = f(x)$, persamaan 2.27 menjadi :

$$E(Y|x') = \alpha + \beta f(x') \quad (2.38)$$

Dengan demikian persamaan tersebut mempunyai bentuk matematis yang sama dengan persamaan regresi linier. Jika pasangan data pengamatan (x_i, y_i) juga ditransformasikan ke $\{f(x_i), (y_i)\}$ atau (x_i', y_i') , maka regresi nonlinier semula antara x dan y berubah menjadi regresi linier antara variabel x' dan y' . Sehingga koefisien-koefisien regresi α , β dan $\text{Var}(Y|x)$ yang bersangkutan dapat diperoleh.

2.5.2. Analisis Korelasi

Pada bagian ini dibahas analisis korelasi yang digunakan untuk menguji perbandingan antara data hasil perhitungan dan pengukuran dalam rangka modifikasi persamaan angkutan sedimen (rumus Ackers dan White). Dari analisis ini dapat diketahui tingkat hubungan atau korelasi antara dua data tersebut. Ada beberapa parameter statistik yang dapat digunakan untuk menguji kecocokan dari suatu persamaan, yaitu antara lain "*discrepancy ratio*" R_D (Bechteller & Vetter, 1989; Wu, 1999; Yang & Wan, 1991; dan Hydrau-Tech, Inc., 1998) dan koefisien korelasi C_c (Hydrau-Tech, Inc., 1998). Persamaan untuk menghitung parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut :

$$\overline{R_D} = \sum \frac{R_i}{N} \quad , \quad R_i = \frac{X_i}{Y_i} \quad (2.39)$$

$$C_c = \frac{\sum (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \overline{X})^2 \sum (Y_i - \overline{Y})^2}} \quad (2.40)$$

dimana :

X_i = sedimentasi hasil perhitungan

Y_i = sedimentasi hasil pengukuran

$\overline{X_i}$ = sedimentasi hasil perhitungan rerata

\bar{Y}_i = sedimentasi hasil pengukuran rerata

I = nomer urut data

N = jumlah data

Untuk memperoleh hasil pengujian yang baik, maka parameter diatas harus mempunyai nilai sama dengan satu ($R_D = 1$ dan $C_c = 1$).

2.6. Kriteria Perancangan BPS

Perhitungan efisiensi dalam perencanaan BPS tempat penelitian ini, dilakukan menurut Kriteria Perencanaan (KP) yang disusun oleh Direktorat Pengairan Departemen Pekerjaan Umum (1986) dengan tahapan seperti ditunjukkan dalam Laporan Perhitungan Disain yang dilakukan oleh PT Gracia Widyakarsa (1996) seperti berikut ini.

1. Pendahuluan

Pembuatan bangunan penangkap sedimen (BPS) pada jaringan irigasi diputuskan berdasarkan pertimbangan ekonomis. Pertimbangan tersebut mencakup semua factor yang akan mempengaruhi biaya dan kemudahan eksploitasi jaringan itu. Disebutkan bahwa BPS tidak akan diperlukan jika volume sedimen yang masuk ke jaringan irigasi tidak sampai ke sawah (partikel yang lebih besar dari 0,06 sampai dengan 0,07 mm) kurang dari 5% kedalaman air diseluruh jaringan irigasi yang ada (5% dari kedalaman saluran kali lebar dasar kali panjang).

2. Sedimen

Perencanaan BPS tergantung pada data tentang sedimen di sungai, antara lain adalah :

- pembagian butir
- penyebaran kearah vertikal
- sedimen layang

- sedimen dasar
- volume.

Apabila data dimaksud tidak ada, maka beberapa harga praktis dapat digunakan dalam perhitungan yaitu : volume bahan layang yang harus diendapkan diambil 5 ‰ dari volume air yang mengalir melalui PBS. Ukuran butiran yang harus diendapkan tergantung kepada kapasitas angkutan sedimen di saluran irigasinya. Dianjurkan bahwa sebagian besar (60% dan 70%) dari pasir halus terendapkan yaitu partikel-partikel dengan diameter 0,06 sampai dengan 0,07 mm.

3. Dimensi BPS

Faktor-faktor yang berpengaruh dalam penentuan dimensi BPS adalah sebagai berikut :

- a. Kecepatan aliran harus cukup rendah, sehingga partikel sedimen yang telah mengendap tidak menghambur lagi.
- b. Turbulensi yang mengganggu proses pengendapan harus dicegah
- c. Kecepatan hendaknya tersebar merata keseluruhan potongan melintang, sehingga sedimentasi juga dapat tersebar merata.
- d. Kecepatan aliran tidak boleh kurang dari 0,30 m³/det., guna menghindari tumbuhnya vegetasi.
- e. Peralihan/transisi yang menuju maupun yang keluar dari BPS harus mulus, tidak menimbulkan turbulensi atau pusaran.

Tahapan perencanaan BPS adalah sebagai berikut :

1). Volume endapan



Volume endapan yang akan terjadi diperkirakan berdasarkan konsentrasi sedimen dalam aliran air (C), sehingga :

$$V = C \times Q \times T \quad (2.41)$$

dimana :

V = volume endapan, m³

C = konsentrasi sedimen, ppm

Q = debit saluran rancangan, m³/det.

T = waktu pengurasan/pembilasan, detik

2). Panjang dan lebar BPS

Panjang dan lebar BPS ditentukan berdasarkan persamaan dasar pengendapan (2.14). Dimensi BPS disyaratkan memenuhi kaidah $L/B > 8$, untuk mencegah agar aliran dalam BPS tidak *meander*. Apabila kondisi topografi tidak memungkinkan untuk memenuhi kaidah diatas maka kantong BPS harus dibagi-bagi dengan dinding pemisah (*divider wall*) hingga memenuhi syarat.

3). Kemiringan aliran

Kemiringan saluran dalam BPS dibagi menjadi dua yaitu untuk aliran normal dan pembilasan. Untuk aliran normal sesuai kebutuhan irigasi dibatasi oleh kecepatan rendah untuk mencegah vegetasi. Sedangkan untuk aliran pembilasan disesuaikan dengan jenis material sedimen yang akan dibuang. Persamaan yang digunakan untuk perhitungan adalah rumus Manning seperti berikut ini :

$$I = \frac{V^2}{\left(\frac{1}{n} R^{2/3}\right)^2} \quad (2.42)$$

dimana :

I = kemiringan dasar aliran

V = kecepatan aliran, m/det.

R = jari-jari penampang basah, m

n = koefisien kekasaran

4). Perhitungan Efisiensi

Efisiensi pengendapan sedimen dalam BPS ditentukan dengan menggunakan metode grafik Camp (1945) seperti diuraikan dalam sub bab 2.4.

4. Pembilasan (*Flushing*)

Pembilasan dimaksudkan untuk menggelontor material yang mengendap di bangunan penangkap sedimen kembali ke sungai melalui pintu pembilasan. Selama pengoperasian saluran irigasi, pintu pembilasan selalu dalam kondisi tertutup dan selama pembilasan, pintu pembilasan dibuka penuh. Debit pembilasan dikendalikan dengan pengaturan pintu pengambilan (intake) di bendung.

Debit pembilasan yang disyaratkan adalah 1,2 kali debit rancangan untuk irigasi. Hal ini dimaksudkan untuk memenuhi besarnya gaya seret yang dibutuhkan untuk menggerus dan mengangkat sedimen.

Kemampuan pembilasan diperkirakan dengan perhitungan gaya seret (tractive force) sebagai berikut :

$$\tau = \gamma \times R \times S \times g \quad (2.43)$$

dimana :

τ = gaya seret (tractive force), N/m^2

γ = berat spesifik air
= 1000 kg/m^3

R = jari-jari hidrolis, m.

S = kemiringan permukaan air

g = gravitasi ($= 9,81 \text{ m/det}^2$)

Sedangkan formulasi pengalirannya menggunakan rumus Manning.

Asumsi yang digunakan dalam perhitungan pembilasan sedimen adalah sebagai berikut :

- Perhitungan gaya seret dilakukan untuk 2 (dua) kondisi yaitu pada saat bangunan penuh sedimen dan mendekati kosong.
- Kecepatan dan gaya seret yang diijinkan mengacu pada nilai yang diberikan oleh USBR.

Melalui perhitungan waktu pengendapan, ukuran bangunan dan jumlah sedimen yang terendapkan diperoleh jangka waktu (periode) pembilasannya.

BAB III

METODA PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Secara garis besar kajian efektivitas bangunan penangkap sedimen ini dilakukan dengan dua (2) tahapan yaitu, tahap penelitian di lapangan dan penelitian secara analisis. Penelitian di lapangan dimaksudkan untuk mengamati dan memperoleh data-data nyata yang dilakukan secara langsung melalui pengukuran dan pengambilan contoh (sample) dan dilanjutkan dengan analisis di laboratorium. Dalam penelitian di lapangan dilaksanakan menjadi 2 kondisi yaitu, “*running*” dengan kondisi debit bervariasi dan debit disain.

Analisis dilakukan dengan 2 tahap yaitu, tahap pertama membuat formulasi dengan menggunakan data yang diperoleh berdasarkan kondisi debit bervariasi. Hasil formulasi tersebut akan diuji validitasnya dengan menggunakan metode Camp, Vetter dan angkutan sedimen. Data yang digunakan adalah hasil “*running*” dengan kondisi debit disain. Hasil analisis tersebut merupakan nilai efisiensi pengendapan sedimen untuk mengetahui efektivitas dari suatu BPS.

Penelitian lapangan dilakukan di bangunan penangkap sedimen (BPS) pada jaringan irigasi Penggaron Kanan Bendung Pucanggading, Kabupaten Demak. Sedangkan analisis laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Pengaliran Universitas Diponegoro dan Laboratorium Mekanika Tanah dan Bahan Politeknik Negeri Semarang. Kegiatan penelitian lapangan yang dilakukan meliputi pengukuran dan pengambilan contoh sedimen, serta pengukuran kecepatan aliran dan luas penampang basah yang digunakan untuk perhitungan debit aliran.

Analisis dalam penelitian ini dilakukan menurut 3 skenario, yaitu :

1. Skenario 0

Pada skenario ini dilakukan modifikasi rumus Ackers dan White yang akan digunakan untuk menghitung angkutan sedimen total yang masuk dan keluar BPS. Data yang dipakai adalah hasil *running* kondisi debit disain. Rumus hasil modifikasi tersebut akan digunakan untuk menghitung efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode sedimentasi.

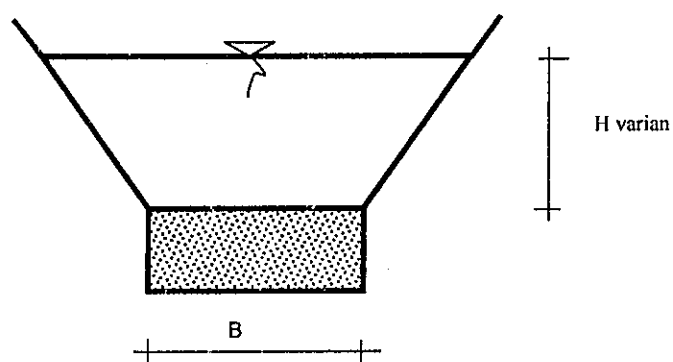
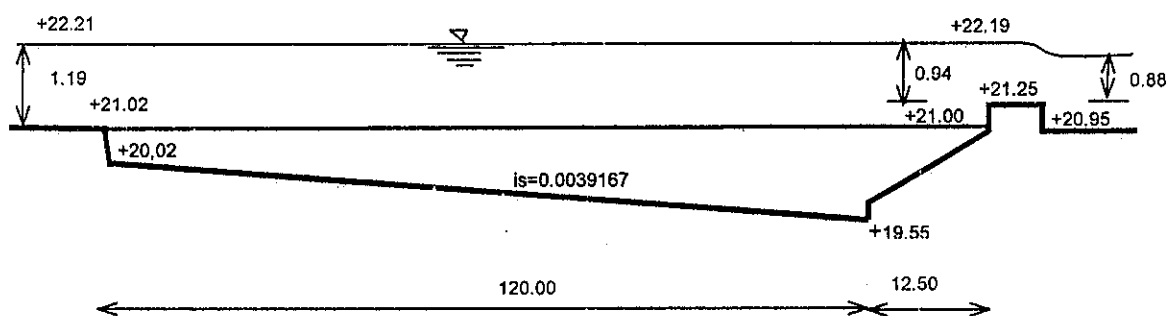
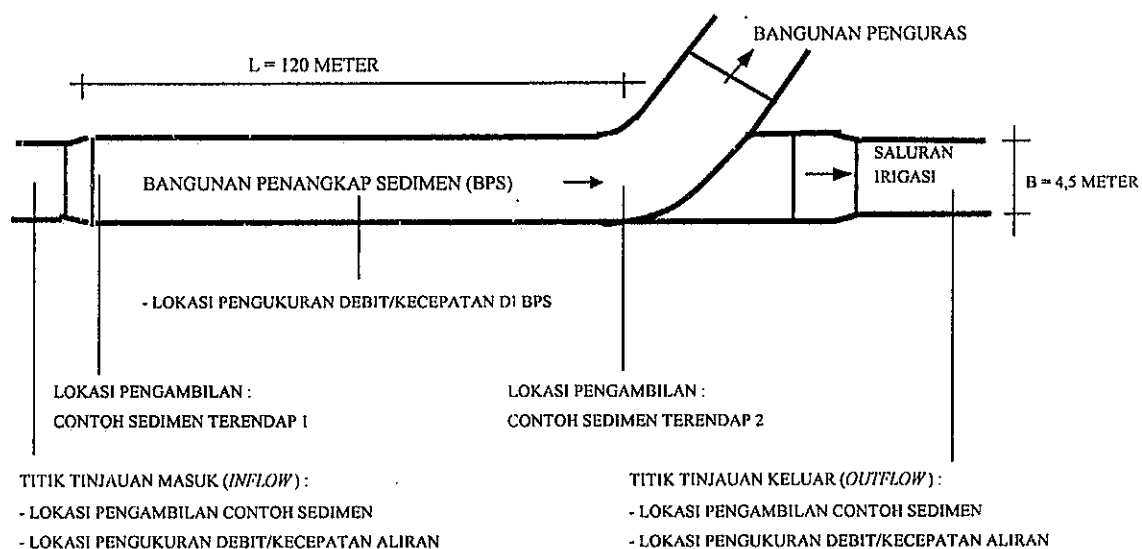
2. Skenario 1

Dalam skenario ini dibuat suatu persamaan atau formulasi secara empiris untuk menghitung efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan menggunakan data hasil *running* kondisi debit bervariasi.

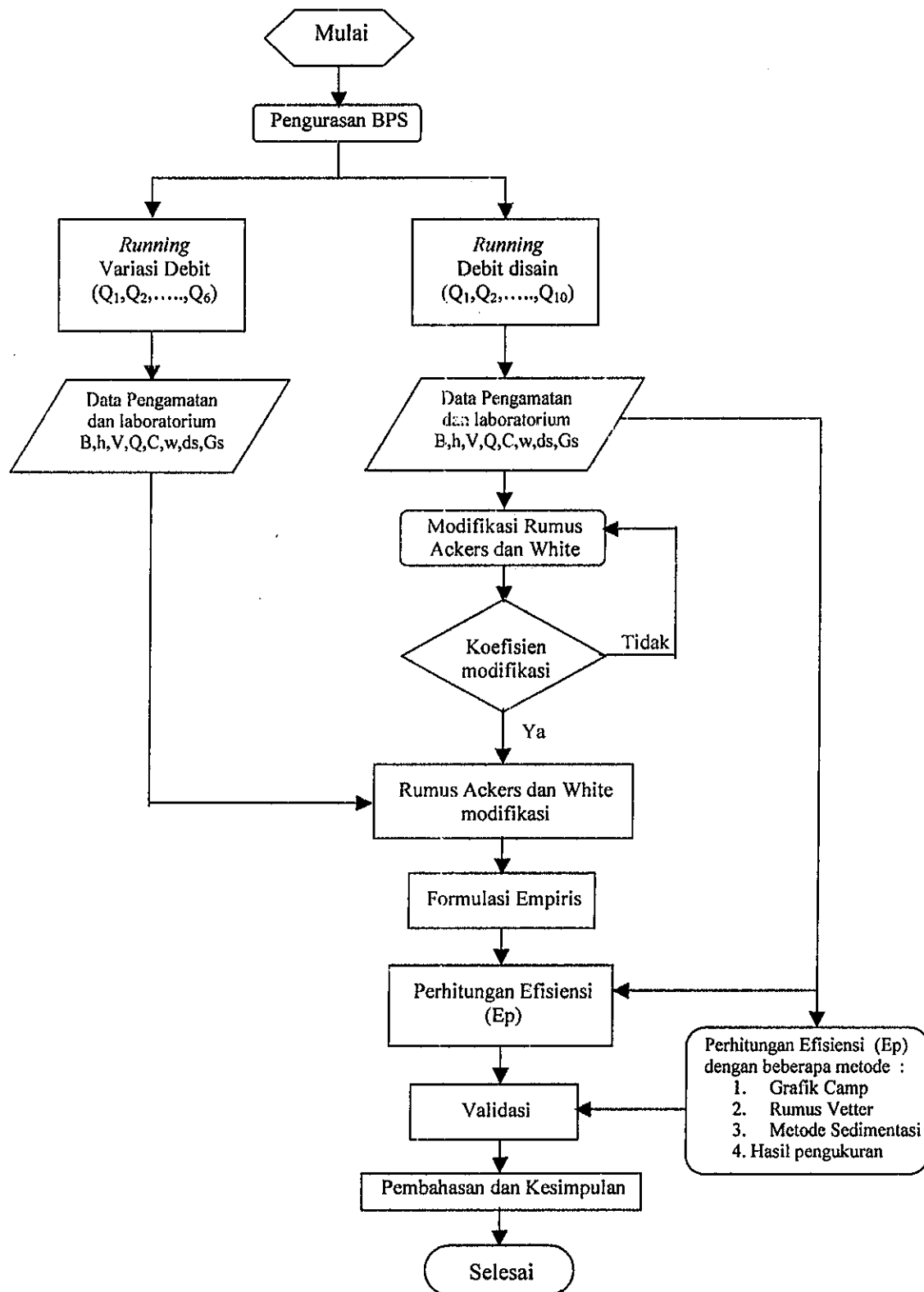
3. Skenario 2

Dalam skenario ini dilakukan uji validitas persamaan yang dihasilkan menurut formulasi secara empiris pada skenario 1. Pengujian dilakukan melalui cara perbandingan dengan data hasil pengukuran maupun hasil perhitungan dengan metode yang telah ada yaitu Grafik Camp, Rumus Vetter dan metode sedimentasi dengan menggunakan persamaan angkutan sedimen total Ackers dan White Modifikasi. Data yang digunakan adalah hasil *running* dengan kondisi debit disain, sehingga nilai efisiensi yang diperoleh merupakan nilai yang dikaji untuk mengetahui efektivitas BPS.

Tahapan pelaksanaan penelitian diuraikan dengan bagan alir seperti disajikan pada Gambar 3.2. Bagan alir pelaksanaan penelitian.



Gambar 3.1. Kondisi Bangunan Penangkap Sedimen tempat Penelitian



Gambar 3.2. Bagan alir pelaksanaan penelitian

3.2. Alat untuk penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa jenis peralatan untuk pengukuran geometri aliran (hidrolika), dan pengambilan sampel sedimen untuk dianalisis di laboratorium guna mengetahui karakteristik sedimennya.

Peralatan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Alat ukur muatan sedimen dasar jenis Helley Smith
2. Alat pengambil contoh sedimen layang (suspended load), jenis USDH 48.
3. Alat ukur kecepatan arus (current meter) jenis H-S OSS-PC 1, model CMC 20.
4. Papan duga dan stik besi.
5. Roll meter.
6. Botol dan kantong plastik tempat contoh sedimen.

3.3. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini ada dua (2) yaitu, data primer dan sekunder. Data primer merupakan data yang diperoleh melalui pengukuran dan pengambilan contoh secara langsung di lapangan, sedangkan data sekunder merupakan hasil olahan atau data yang diperoleh dari sumber lain. Data primer dalam hal ini meliputi dimensi bangunan penangkap sedimen, serta data aliran yang terdiri dari kedalaman (penampang basah) dan kecepatan aliran. Data sekunder meliputi konsentrasi sedimen, debit aliran, diameter butiran dan berat jenis sedimen.

Untuk memperoleh data diatas dilakukan dengan cara pengukuran dan pengambilan sampel secara langsung, serta ditindaklanjuti pengujian dan analisis laboratorium. Secara rinci kegiatan penelitian ini terdiri dari :

1) Penelitian Lapangan, meliputi :

- a. Pengukuran tinggi muka air
- b. Pengukuran penampang melintang bangunan

- c. Kecepatan aliran dan debit
- d. Pengambilan contoh ("sample") sedimen

2) Penelitian Laboratorium, meliputi :

- a. Pengukuran konsentrasi sedimen layang (suspended load)
- b. Pengukuran berat sedimen dasar (bed load)
- c. Analisis butiran (gradasi) sedimen
- d. Pengukuran berat jenis sedimen
- e. Pengukuran kerapatan sedimen

3.3.1. Lokasi Pengambilan contoh (*sample*)

Lokasi pengukuran dan pengambilan contoh ("sample") masing-masing adalah di bagian akhir saluran hantar (1,00 meter di hulu bangunan penangkap sedimen dan di bagian awal saluran irigasi (2,00 meter di hilir bangunan penangkap sedimen). Lokasi tersebut ditetapkan sedemikian rupa sehingga diasumsikan dapat mewakili data hidrolis dan angkutan sedimen yang akan diteliti. Untuk mengetahui kondisi (parameter) pada bangunan penangkap sedimen dilakukan pengukuran debit di bagian tengah (arah memanjang bangunan), serta pengambilan contoh sedimen yang telah mengendap di bangunan penangkap sedimen sebanyak tiga (3) contoh masing-masing diambil dari bagian paling hulu, tengah dan paling hilir. Lokasi pengambilan contoh dan pengukuran hidrolis tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1.

3.3.2. Kondisi Pengukuran dan Pengambilan Contoh Sedimen

Metoda pengukuran dan pengambilan contoh sedimen serta pengujian laboratorium didasarkan pada Standar (SNI) atau referensi lain yang berlaku

dalam pengukuran "hidrometri". Dalam penelitian ini kondisi aliran dirancang dengan dua (2) tinjauan yaitu pada kondisi debit bervariasi dan debit rancangan.

1) Kondisi Debit Bervariasi

Kondisi ini dimaksudkan untuk memperoleh data sesuai dengan debit yang dirancang atau dialirkan dalam penelitian ini, sehingga dapat diketahui korelasi beberapa data geometri hidrolika dan karakteristik sedimen serta nilai efisiensi pengendapan BPS berdasarkan variasi debit yang dialirkan tersebut. Enam (6) variasi debit dialirkan dalam penelitian ini. Pengaliran dimulai dari debit besar ke debit yang lebih kecil berturut-turut yaitu, $4,0 \text{ m}^3/\text{det.}$, $3,22 \text{ m}^3/\text{det.}$, $2,5 \text{ m}^3/\text{det.}$, $2,0 \text{ m}^3/\text{det.}$, $1,5 \text{ m}^3/\text{det.}$ dan $1,0 \text{ m}^3/\text{det.}$ Setiap kali pengukuran diikuti pengambilan tiga (3) contoh untuk konsentrasi sedimen layang dan satu (1) contoh untuk sedimen dasar. Semua kegiatan tersebut dilakukan dalam satu (1) hari.

Kondisi pengukuran dengan debit bervariasi tersebut dibatasi oleh 2 kendala yaitu, ketersediaan debit sungai dan kapasitas saluran irigasi yang ada. Variasi data debit ini dibuat dengan interval sekecil mungkin sehingga masih berpengaruh terhadap variasi data yang diperoleh.

Dengan menggunakan data tersebut diatas akan dicoba membuat formulasi nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS secara empirik.

2) Kondisi Debit Rancangan (*Design*)

Kondisi ini dilakukan untuk memperoleh data aliran sesuai dengan rancangan BPS sehingga dapat dilakukan analisis efisiensi pengendapan sedimen guna mengetahui efektivitas BPS yang ada. Sesuai dengan hasil perencanaan, maka kondisi aliran dirancang dengan debit $3,227 \text{ m}^3/\text{det.}$

Pengukuran kecepatan dan penampang basah untuk mengetahui debit yang mengalir dilakukan sebanyak sepuluh (10) kali yang dilaksanakan selama empat (4) hari dalam satu minggu. Setiap kali pengukuran diikuti pengambilan tiga (3) contoh untuk konsentrasi sedimen layang dan satu (1) contoh untuk sedimen dasar.

Pada kondisi ini pelaksanaan pengukuran dibatasi oleh kendala waktu dan kondisi konsentrasi air. Waktu pengukuran dilakukan dalam kurun waktu tujuh hari sesuai dengan periode pengurasan (*flushing*) endapan dari BPS. Adapun kondisi air harus mempunyai konsentrasi sedimen yang cukup tinggi agar diperoleh data angkutan sedimen.

Data yang diperoleh pada kondisi ini akan digunakan untuk validasi persamaan hasil formulasi empirik dengan menggunakan persamaan Vetter dan metode Grafik Camp.

Ketentuan untuk posisi pengukuran kecepatan arus dilakukan pada tiga (3) titik horisontal dengan penyebaran merata yaitu masing-masing adalah pada h_1 , h_2 , dan h_3 . Masing-masing titik tersebut dilakukan pengukuran sebanyak tiga (3) kali. Adapun pengukuran dengan penyebaran secara vertikal masing-masing dilakukan pada kedalaman 0,2 h, 0,6 h dan 0,8 h untuk bagian saluran/bangunan dengan kedalaman lebih besar dari 1,00 meter, sedangkan untuk bagian saluran dengan kedalaman kurang dari 1,00 meter dilakukan pengukuran hanya pada kedalaman 0,6 h.

Waktu pengambilan contoh sedimen pada bagian masuk (*inflow*) dengan bagian keluar (*outflow*) bangunan penangkap sedimen dilakukan sedemikian rupa sehingga bersesuaian dengan kondisi angkutan sedimen.

3.3.3. Pengukuran Muka Air

Penentuan tinggi muka air dari dasar bangunan dilakukan dengan cara mengukur langsung dengan batang besi serta melalui pengamatan papan duga air yang telah diberi skala dan dipasang pada lokasi penelitian yang telah ditentukan.

3.3.4. Pengukuran Kecepatan Aliran dan Debit

Untuk pengukuran kecepatan aliran (arus) dilakukan dengan menggunakan alat "current meter" melalui pembacaan nilai putaran kincir per detik. Pelaksanaan dan kondisi pengukuran dilakukan sesuai dengan ketentuan yang telah ditetapkan seperti diuraikan pada bagian terdahulu. Dengan cara mengkalibrasi pembacaan putaran kincir tersebut, maka dapat diperoleh nilai kecepatan rata-ratanya. Sedangkan debit aliran diperoleh dari hasil perkalian antara kecepatan rata-rata dengan luas penampang basah hasil pengukuran. Formulasi kecepatan arus hasil kalibrasi alat ukur *currentmeter* adalah seperti diuraikan pada persamaan 2.11a sampai dengan 2.11c.

3.3.5. Pengukuran Penampang Melintang Bangunan

Penampang melintang bangunan diukur dengan cara pengukuran tinggi kedalaman air dan lebar penampang basah. Berdasarkan data tersebut, maka dapat ditentukan luas penampang basahnya.

3.3.6. Pengukuran Angkutan Sedimen

a. Sedimen Dasar

Dari hasil pengukuran secara langsung angkutan sedimen dasar diperoleh data berupa berat contoh sedimen yang tertangkap oleh alat

ukur (jenis Helley Smith) dengan periode waktu pengukuran selama 5 menit. Berdasarkan data berat sedimen tersebut, maka dapat dihitung besarnya angkutan sedimen dasar dengan menggunakan persamaan 2.6. Jumlah angkutan sedimen ini dihitung sesuai periode waktu pengurasan yang mengacu pada hasil perencanaan yaitu selama tujuh (7) hari. Efisiensi alat ukur berdasarkan hasil kalibrasi alat adalah 80%, dan lebar saluran di lokasi pengukuran adalah empat setengah (4,5) meter.

b. Sedimen Layang

Untuk menghitung sedimen layang ini diperlukan data konsentrasi sedimen (C). Data ini diperoleh dari contoh ("*sample*") yang telah diambil dengan menggunakan botol "*sampler*" jenis USDH 48 dan dianalisis di laboratorium dengan menggunakan metode penguapan. Analisis yang dilakukan meliputi perhitungan berat sedimen, pengukuran volume contoh serta perhitungan konsentrasinya.

Berdasarkan data konsentrasi (C) tersebut dapat dilakukan perhitungan angkutan sedimen layang dengan menggunakan persamaan 2.7. Jumlah angkutan sedimen dihitung sesuai periode waktu pengurasan yaitu selama tujuh (7) hari.

3.3.7. Gradasi Butiran

Pengujian gradasi butiran sedimen meliputi uji ayakan dan *hidrometer*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui diameter butiran sedimen yang ada. Data tersebut diperlukan untuk mengetahui

kecepatan endap partikel sedimen yang merupakan parameter untuk menghitung angkutan sedimen dan efisiensi.

Analisis gradasi ini dilakukan untuk contoh sedimen dasar yang diambil dengan alat ukur angkutan sedimen dasar jenis Helley Smith dan contoh sedimen yang diambil secara langsung dari endapan yang ada di saluran dan kantong sedimen.

3.4. Perhitungan Angkutan Sedimen

Besarnya angkutan sedimen dalam penelitian ini dihitung berdasarkan rumus angkutan sedimen total menurut Ackers dan White (1973) setelah dilakukan modifikasi berdasarkan hasil pengukuran langsung. Modifikasi tersebut bertujuan agar rumus Ackers dan White sesuai dengan kondisi yang ada di sungai/saluran tempat penelitian dilaksanakan.

Modifikasi rumus Ackers dan White dilakukan dengan cara mencocokkan harga kuantitatif angkutan sedimen antara hasil perhitungan (*calculated*) menggunakan metode Ackers dan White dengan angkutan sedimen hasil pengukuran langsung (*measured*). Dengan menambahkan suatu koefisien empirik pada rumus Ackers dan White, maka diperoleh persamaan baru. Hasil perhitungan angkutan sedimen dengan persamaan baru tersebut apabila diplotkan secara grafis dengan angkutan sedimen hasil pengukuran akan diperoleh titik-titik *plotting* yang mendekati garis *perfect* yaitu, garis yang membentuk sudut 45° dengan garis horisontal. Persamaan baru yang dihasilkan merupakan modifikasi rumus Ackers dan White. Selanjutnya persamaan hasil modifikasi tersebut digunakan untuk perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS, yaitu dengan cara membandingkan antara selisih

angkutan sedimen masuk dan keluar BPS dengan seluruh angkutan sedimen yang lewat.

3.5. Efisiensi Pengendapan Sedimen

Dalam penelitian ini akan dibuat suatu persamaan berdasarkan formulasi empirik menggunakan data hasil pengukuran (*running*) kondisi debit bervariasi. Persamaan hasil formulasi ini akan dipakai untuk menghitung efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan menggunakan data hasil *running kondisi debit disain*. Hasil perhitungan tersebut kemudian diverifikasi dengan hasil perhitungan menggunakan metode Camp, Vetter dan Ackers dan White dengan menggunakan data hasil *running kondisi debit disain*. Rerata hasil perhitungan ini merupakan nilai efisiensi BPS yang diteliti dan akan dibandingkan dengan hasil perhitungan pada saat perencanaan. Dari perhitungan tersebut akan dapat disimpulkan efektivitas BPS (obyek penelitian) dalam mengendapkan sedimen yang masuk ke saluran irigasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

4.1.1. Tinjauan Obyek Penelitian

a. Dimensi Bangunan

Berdasarkan buku Laporan Perhitungan Disain bangunan penangkap sedimen di bendung Pucanggading oleh konsultan PT Gracia Widyakarsa (1996) diperoleh data teknis sebagai berikut :

1. Debit Pengambilan Irigasi

- Nama bangunan pengambilan (intake) : DI. Penggaron Kanan
- Debit pengambilan : 3,227 m³/det.

2. Dimensi Bangunan

- Bentuk penampang : trapesium dengan kantong sedimen segi empat
- Panjang bangunan : 117 meter
- lebar dasar = 5 meter
- kemiringan talud = 1 V : 1 H
- kemiringan dasar, $I_n = 0,000124$

$$I_f = 0,002981$$

- kedalaman bagian masukan = 2,66 meter
- kedalaman bagian keluaran = 3,06 meter

3. Volume bangunan penangkap sedimen (kantong sedimen)

$$V = (d \times b \times L) + (0,5 \times (I_s - I_n) \times L^2 \times b) = 975,85 \text{ m}^3$$

b. Perhitungan Efisiensi Pengendapan Sedimen

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen di bendung Pucanggading oleh PT Gracia Widyakarsa (1996) adalah sebagai berikut :

- Data hidrolis : $h_o = 1,164 \text{ m}$
 $V_o = 0,495 \text{ m/det.}$
- Konsentrasi sedimen $C = 0,5 \text{ ‰}$
- Material terendap :
 $\# \text{ diameter } d_o = 0,066 \text{ mm.}$
 $\# \text{ kecepatan endap } \omega_o = 0,0049 \text{ m/det.}$
 $\# \text{ kecepatan endap rencana } \omega = 0,004 \text{ m/det.}$
- Efisiensi pengendapan
 Berdasarkan harga ω/ω_o dan ω/V_o , maka dengan menggunakan grafik Camp (1945) diperoleh harga efisiensi $E = 68 \text{ ‰}$

c. Periode pengurasan

Jangka waktu (periode) pengurasan berdasarkan perencanaan adalah tujuh (7) hari.

Dimensi dan situasi bangunan penangkap sedimen yang digunakan untuk obyek penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.

4.1.2. Parameter Pengendapan Sedimen di Bangunan Penangkap Sedimen

Data geometri aliran dan parameter sedimen yang berpengaruh terhadap pengendapan sedimen di bangunan penangkap sedimen (BPS) yang telah diukur sesuai dengan metoda penelitian seperti diuraikan pada Bab III adalah sebagai berikut :

yang telah diukur sesuai dengan metoda penelitian seperti diuraikan pada Bab III adalah sebagai berikut :

- 1) Kecepatan aliran (v), m/det.
- 2) Tinggi/kedalaman aliran (h), m.
- 3) Lebar penampang basah (B), m.
- 4) Debit aliran (Q), $m^3/det.$
- 5) Konsentrasi Sedimen (C), g/l.
- 6) Angkutan sedimen (Q_s), $m^3/det.$
- 7) Diameter butiran sedimen (d_s), mm.

4.1.3. Pengukuran Kecepatan

Nilai kecepatan arus ditetapkan melalui pembacaan putaran kincir alat ukur "*current meter*". Dengan memasukkan nilai pembacaan putaran kincir kedalam rumus yang diperoleh dari hasil kalibrasi pada alat ukur (persamaan 2.11a, 2.11b, 2.11c), maka dapat diperoleh nilai kecepatan arusnya. Rangkuman hasil pengukuran ini disajikan pada tabel 4.1a. sampai 4.1f. Sedangkan hasil selengkapnya disajikan pada Lampiran C. Hasil pengukuran kecepatan arus dan perhitungan debit.

4.1.4. Perhitungan Debit

Dari hasil pengukuran kecepatan arus, maka dapat dihitung debit aliran dengan cara mengalikan kecepatan arus diatas dengan luas penampang basah yang diukur di lapangan. Pengukuran tinggi aliran berdasarkan pada kondisi yang ada di lapangan yaitu, sesuai dengan permukaan endapan yang terjadi.

Rangkuman hasil pengukuran dan perhitungan debit ini disajikan pada tabel 4.1a. sampai 4.1f. Sedangkan hasil selengkapnya disajikan pada Lampiran C. Hasil pengukuran kecepatan arus dan perhitungan debit.

Tabel 4.1a. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hulu BPS pada kondisi debit rancangan

No.	Tanggal Pengukuran	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	1,19	6,771	0,464	3,144
2	21-02-2004	1,19	6,777	0,476	3,229
3	24-02-2004	1,19	6,771	0,475	3,216
4	24-02-2004	1,19	6,765	0,464	3,137
5	24-02-2004	1,19	6,783	0,493	3,347
6	25-02-2004	1,19	6,771	0,462	3,128
7	25-02-2004	1,19	6,765	0,477	3,230
8	25-02-2004	1,19	6,771	0,495	3,350
9	26-02-2004	1,19	6,765	0,467	3,162
10	26-02-2004	1,18	6,702	0,483	3,240

Tabel 4.1b. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di BPS pada kondisi debit rancangan

No.	TANGGAL PENGUKURAN	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	2,40	13,410	0,234	3,138
2	21-02-2004	2,39	13,338	0,241	3,226
3	24-02-2004	2,32	13,040	0,246	3,208
4	24-02-2004	2,30	12,940	0,242	3,131
5	24-02-2004	2,25	12,708	0,263	3,342
6	25-02-2004	2,10	11,922	0,262	3,124
7	25-02-2004	2,05	11,696	0,276	3,228
8	25-02-2004	2,00	11,458	0,292	3,346
9	26-02-2004	1,76	10,252	0,308	3,158
10	26-02-2004	1,66	9,764	0,331	3,232

Tabel 4.1c. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hilir BPS pada kondisi debit rancangan

No.	TANGGAL PENGUKURAN	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	1,19	6,771	0,464	3,141
2	21-02-2004	1,19	6,777	0,474	3,215
3	24-02-2004	1,19	6,771	0,474	3,210
4	24-02-2004	1,19	6,771	0,462	3,130
5	24-02-2004	1,19	6,777	0,492	3,333
6	25-02-2004	1,19	6,765	0,46	3,112
7	25-02-2004	1,19	6,765	0,477	3,225
8	25-02-2004	1,19	6,777	0,492	3,338
9	26-02-2004	1,19	6,765	0,465	3,149
10	26-02-2004	1,19	6,777	0,476	3,227

Tabel 4.1d. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hulu BPS pada kondisi debit bervariasi

No.	TANGGAL PENGUKURAN	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	0,88	4,752	0,220	1,046
2	21-02-2004	1,00	5,500	0,292	1,606
3	21-02-2004	1,08	6,021	0,344	2,070
4	21-02-2004	1,13	6,356	0,379	2,411
5	21-02-2004	1,19	6,777	0,476	3,229
6	21-02-2004	1,22	6,978	0,541	3,776

Tabel 4.1e. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di BPS pada kondisi debit bervariasi

No.	TANGGAL PENGUKURAN	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	2,01	10,803	0,096	1,036
2	21-02-2004	2,16	11,790	0,137	1,619
3	21-02-2004	2,25	12,400	0,166	2,057
4	21-02-2004	2,32	12,860	0,188	2,420
5	21-02-2004	2,39	13,378	0,241	3,227
6	21-02-2004	2,43	13,614	0,277	3,773

Tabel 4.1f. Rangkuman hasil pengukuran kecepatan dan perhitungan debit di hilir BPS 1 pada kondisi debit bervariasi

No.	TANGGAL PENGUKURAN	H (m)	A (m ²)	V (m/det)	Q (m ³ /det)
1	21-02-2004	0,88	4,743	0,219	1,040
2	21-02-2004	0,99	5,445	0,294	1,600
3	21-02-2004	1,08	6,021	0,343	2,066
4	21-02-2004	1,12	6,294	0,382	2,403
5	21-02-2004	1,19	6,777	0,477	3,215
6	21-02-2004	1,21	6,909	0,546	3,769

4.1.5. Gradasi Butiran Sedimen

Analisis gradasi butiran sedimen diperlukan untuk mengetahui diameter sedimen yang terangkut aliran. Dari hasil analisis gradasi ini diperoleh diameter butiran sedimen d_s (d_{50}) yang merupakan salah satu parameter untuk perhitungan angkutan sedimen.

Analisis gradasi butiran sedimen dilakukan dengan metoda ayakan dan hidrometer. Analisis gradasi hanya dapat dilakukan pada sampel yang diambil dengan alat ukur sedimen dasar jenis “Helley Smith” serta sampel yang diambil dari sedimen yang telah mengendap. Hasil uji laboratorium untuk sampel yang diambil dengan alat ukur diatas, pada kondisi debit disain menunjukkan diameter butiran sedimen (d_{50}) bervariasi antara 0,049 mm sampai 0,055 mm. Pada kondisi debit bervariasi diketahui diameter butiran sedimennya berkisar antara 0,042 mm sampai 0,056 mm. Sedangkan untuk sampel yang diambil dari endapan mempunyai diameter (d_{50}) 0,051 mm. Berdasarkan klasifikasi tektur, maka sedimen yang ada berupa *sandy clay*. Hasil uji laboratorium gradasi butiran sedimen selengkapnya disajikan pada Lampiran B.2. Hasil uji laboratorium gradasi butiran sedimen.

4.1.6. Pengukuran Angkutan Sedimen

Angkutan sedimen hasil pengukuran merupakan data utama untuk perhitungan analisis pengendapan sedimen di BPS dan efisiensinya. Data hasil pengukuran pada *running* kondisi debit bervariasi digunakan untuk analisis formulasi empirik, sedangkan data kondisi debit disain digunakan untuk modifikasi persamaan Ackers dan White (2.12) dan perhitungan efisiensi untuk validasi persamaan hasil formulasi empirik.

Angkutan sedimen layang dihitung dengan menggunakan data konsentrasi sedimen (C) dan angkutan sedimen dasar dihitung menggunakan data berat sedimen dasar (w) yang tertangkap alat ukur Helley Smith seperti telah diuraikan dalam sub bab 2.3. Angkutan sedimen total hasil pengukuran merupakan penjumlahan dari kedua angkutan sedimen diatas.

Berdasarkan hasil uji laboratorium diketahui pada *running* kondisi debit disain nilai C berkisar antara 0,7593 g/l sampai 1,8659 g/l untuk sampel yang diambil pada bagian masuk ke BPS dan antara 0,4142 g/l sampai 0,9306 g/l untuk sampel yang diambil pada bagian keluar dari BPS. Sedangkan pada *running* kondisi debit bervariasi nilai C berkisar antara 1,3867 g/l sampai 1,6089 g/l untuk sampel di bagian masuk ke BPS dan antara 0,5817 g/l sampai 0,9548 g/l untuk sampel pada bagian keluar dari BPS. Hasil analisis laboratorium konsentrasi sedimen (C) selengkapnya disajikan pada Lampiran A.1. Hasil uji laboratorium konsentrasi sedimen (C), serta berat sedimen dasar (w) hasil pengukuran disajikan pada Lampiran A.2. Berat sedimen dasar hasil pengukuran dengan alat ukur jenis "Helley Smith". Sedangkan perhitungan angkutan sedimen total hasil

pengukuran disajikan pada Tabel 4.2a. Angkutan sedimen total yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit disain, Tabel 4.2b. Angkutan sedimen total yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi, Tabel 4.2c. Angkutan sedimen total yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi dan Tabel 4.2d. Angkutan sedimen total yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi.

Tabel 4.2a. Angkutan sedimen total yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit disain

No.	Tanggal	Sedimen Layang				Sedimen Dasar			Total
		Kode Sampel	Q (m ³ /det)	C ₁ (g/l)	L _s (kg/det.)	Kode Sampel	w (g/5menit)	L _b (kg/det.)	L _T (kg/det.)
1	21-2-2004	I1 B1	3,144	1,2594	3,9596	I1 D1	169,94	0,0419	4,0015
2	21-2-2004	I2 B1	3,229	1,5629	5,0466	I1 D2	179,27	0,0442	5,0908
3	24-2-2004	I2 B2	3,216	1,8659	6,0007	I2 D1	186,35	0,0460	6,0467
4	24-2-2004	I2 B3	3,137	1,3955	4,3777	I2 D2	177,62	0,0438	4,4215
5	24-2-2004	I3 B1	3,347	1,7053	5,7076	I2 D3	180,06	0,0444	5,7521
6	25-2-2004	I4 B1	3,128	1,2197	3,8152	I3 D1	162,99	0,0402	3,8554
7	25-2-2004	I5 B1	3,230	1,2768	4,1241	I3 D2	176,03	0,0434	4,1675
8	25-2-2004	I6 B1	3,350	0,7593	2,5437	I3 D3	157,07	0,0388	2,5824
9	26-2-2004	IN B1	3,162	1,1237	3,5531	I4 D1	161,12	0,0398	3,5929
10	26-2-2004	IN B2	3,240	0,8127	2,6331	I4 D2	141,58	0,0349	2,6681

Tabel 4.2b. Angkutan sedimen total yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit disain

No.	TANGGAL SAMPLING	SEDIMEN LAYANG				SEDIMEN DASAR			JUMLAH
		KODE SAMPEL	Q (m ³ /det)	C ₁ (g/l)	L _s (kg/det.)	KODE SAMPEL	w (g/5menit)	L _b (kg/det.)	L _T (kg/det.)
1	21-2-2004	O1 B1	3,144	0,6325	1,9886	-	0,00	0,0000	1,9886
2	21-2-2004	O2 B1	3,229	0,8304	2,6814	-	0,00	0,0000	2,6814
3	24-2-2004	O2 B2	3,216	0,9118	2,9323	-	0,00	0,0000	2,9323
4	24-2-2004	O2 B3	3,137	0,6742	2,1150	-	0,00	0,0000	2,1150
5	24-2-2004	O3 B1	3,347	0,9306	3,1147	-	0,00	0,0000	3,1147
6	25-2-2004	O4 B1	3,128	0,5910	1,8486	-	0,00	0,0000	1,8486
7	25-2-2004	O5 B1	3,230	0,6293	2,0326	-	0,00	0,0000	2,0326
8	25-2-2004	O6 B1	3,350	0,4142	1,3876	-	0,00	0,0000	1,3876
9	26-2-2004	ON B1	3,162	0,5851	1,8501	-	0,00	0,0000	1,8501
10	26-2-2004	ON B2	3,240	0,4605	1,4920	-	0,00	0,0000	1,4920

Tabel 4.2c. Angkutan sedimen yang masuk ke BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi

No.	Tanggal Sampling	Sedimen Layang				Sedimen Dasar			Total
		Kode Sampel	Q (m ³ /det)	C ₁ (g/l)	L _s (kg/det.)	Kode Sampel	w (g/5menit)	L _b (kg/det.)	
1	21-2-2004	I S1	3,776	1,6089	6,0752	I1	181,23	0,0447	6,1199
2	21-2-2004	I S2	3,229	1,4112	4,5566	I2	174,61	0,0431	4,5997
3	21-2-2004	I S3	2,411	1,4104	3,4005	I3	161,29	0,0398	3,4403
4	21-2-2004	I S4	2,070	1,4088	2,9162	I4	139,25	0,0344	2,9506
5	21-2-2004	I S5	1,606	1,3901	2,2325	I5	119,68	0,0295	2,2620
6	21-2-2004	I S6	1,046	1,3867	1,4505	I6	103,65	0,0256	1,4761

Tabel 4.2d. Angkutan sedimen yang keluar dari BPS berdasarkan hasil pengukuran pada kondisi debit bervariasi

No.	Tanggal Sampling	Sedimen Layang				Sedimen Dasar			Total
		Kode Sampel	Q (m ³ /det)	C ₁ (g/l)	L _s (kg/det.)	Kode Sampel	w (g/5menit)	L _b (kg/det.)	
1	21-2-2004	O S1	3,776	0,9548	3,6053	O1	0,00	0,0000	3,6053
2	21-2-2004	O S2	3,229	0,7722	2,4933	O2	0,00	0,0000	2,4933
3	21-2-2004	O S3	2,411	0,7612	1,8353	O3	0,00	0,0000	1,8353
4	21-2-2004	O S4	2,070	0,7337	1,5188	O4	0,00	0,0000	1,5188
5	21-2-2004	O S5	1,606	0,7081	1,1372	O5	0,00	0,0000	1,1372
6	21-2-2004	O S6	1,046	0,5817	0,6085	O6	0,00	0,0000	0,6085

4.1.7. Perhitungan Angkutan Sedimen

Perhitungan angkutan sedimen diperlukan untuk mengetahui pengendapan sedimen di BPS berdasarkan angkutan sedimen yang masuk dan keluar bangunan tersebut, sehingga dapat dihitung pula efisiensi pengendapan sedimennya.

Volume sedimen yang mengendap di dalam bangunan penangkap sedimen dihitung dengan mengurangkan antara angkutan sedimen masuk (*inflow*) kedalam bangunan dengan angkutan sedimen keluar (*outflow*) bangunan dalam periode waktu yang tertentu sesuai dengan periode pengurasan yaitu setiap tujuh (7) hari.

4.1.8. Modifikasi Rumus Ackers dan White

Modifikasi rumus Ackers dan White dilakukan dengan menggunakan pendekatan statistik dan optimasi non-linier. Dalam analisis ini digunakan data lapangan hasil pengukuran yang mencakup data geometri aliran (hidrolika) dan karakteristik sedimen yang berkaitan dengan angkutan sedimen pada kondisi debit rancangan.

Modifikasi dilakukan dengan menambahkan variabel-variabel yang terdiri dari kedalaman aliran h , kecepatan u , dan diameter butiran sedimen d_s (d_{50}) kedalam persamaan Ackers dan White (2.12) sehingga diperoleh bentuk persamaan modifikasi untuk konsentrasi berat sedimen total sebagai berikut :

$$C_w = a C_{AW2} G \frac{d_s}{d} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^b u^c d_s^d \quad (4.1)$$

dimana :

a = koefisien yang dicari

b, c, d = koefisien pangkat dari tinggi aliran, kecepatan aliran dan diameter butiran sedimen.

Optimasi Non-linier

Pada bagian terdahulu telah disebutkan bahwa modifikasi Rumus Ackers dan White dilakukan melalui pendekatan statistik melalui perbandingan antara data lapangan dan hasil perhitungan. Parameter yang digunakan adalah “*discrepancy ratio*” R_D dan koefisien korelasi C_c . Hasil modifikasi harus mempunyai kondisi “*perfect*” yang ditunjukkan dengan nilai parameter diatas sama dengan satu ($R_D = 1$ dan $C_c = 1$).

Dengan menggunakan perangkat lunak “*Microsoft Excel Solver*” maka dapat dilakukan optimasi persamaan Ackers dan White. Melalui cara

iterasi maka diperoleh nilai koefisien yang optimum yaitu ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasi $C_c \sim 1$ dan “trend” data dalam bentuk grafik perbandingan debit angkutan sedimen hasil pengukuran dan perhitungan mendekati pada garis yang membentuk sudut 45° dengan garis horisontal. Optimasi untuk memperoleh nilai $R_D = 1$ dilakukan melalui pengubahan nilai “a” pada persamaan 4.1 dengan menggunakan prosedur iterasi “goal seek tool” pada perangkat “Microsoft Excel Solver”.

Tahapan optimasi *non-linier* untuk modifikasi rumus Ackers dan White adalah sebagai berikut :

1. Pengeplotan nilai Q_s pengukuran dan perhitungan.
2. Optimasi C_c hingga menghasilkan bentuk sebuah garis lurus melalui pengubahan nilai “b, c dan d” dengan cara iterasi pada perangkat “Microsoft Excel Solver”. C_c optimal bila grafik pengeplotan data disekitar garis yang membentuk sudut 45° .
3. Iterasi nilai “a” untuk menghasilkan nilai C_c dan R_D yang optimal.

Hasil optimasi untuk modifikasi persamaan Ackers dan White dengan menggunakan data di bagian hulu BPS adalah $a = 0,941$; $b = 1,059$; $c = 0,733$ dan $d = -0,008$. Perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.3. Perhitungan angkutan sedimen total metode “Ackers dan White”, Tabel 4.4. Analisis optimasi *non-linier* untuk modifikasi Rumus Ackers dan White dan Tabel 4.5. *Discrepany ratio* (R_D) dan koefisien korelasi C_c antara Q_s pengukuran dan Q_s perhitungan, serta Gambar 4.1. Korelasi angkutan sedimen total hasil perhitungan dengan hasil pengukuran menggunakan rumus Ackers dan White dan Ackers dan White Modifikasi.

Tabel 4.3. Perhitungan angkutan sedimen total Metode "Ackers dan White"

Data :

$$B = 4,5 \quad m. \quad S = 0,000124$$

$$Gs = 2,48$$

$$V = 1.12 \times 10^{-6} \quad m^3/det$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	d (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u _* (m/det)	d _*	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mg/l} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	3,144	1,19	6,771	0,861	0,464	0,052	0,03236	1,176	0,96052	0,00046	0,35207	9,5525	1,14459	0,001509	1508,59	1509,94	46,5707	4,75021
2	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,050	0,03237	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17661	0,002236	2236,01	2239,00	70,9237	7,23422
3	3,216	1,19	6,771	0,861	0,475	0,049	0,03236	1,108	0,97497	0,00039	0,35846	10,0553	1,19203	0,002677	2676,89	2681,18	84,5883	8,62801
4	3,137	1,19	6,765	0,860	0,464	0,050	0,03234	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17471	0,002134	2133,63	2136,35	65,7438	6,70587
5	3,347	1,19	6,783	0,862	0,493	0,050	0,03239	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17835	0,002361	2361,37	2364,70	77,6429	7,91957
6	3,128	1,19	6,771	0,861	0,462	0,051	0,03236	1,154	0,96524	0,00044	0,35414	9,71353	1,15947	0,001780	1780,08	1781,97	54,681	5,57747
7	3,230	1,19	6,765	0,860	0,477	0,051	0,03234	1,154	0,96524	0,00044	0,35414	9,71353	1,16026	0,001854	1854,30	1856,36	58,8211	5,99975
8	3,350	1,19	6,771	0,861	0,495	0,055	0,03236	1,244	0,94688	0,00054	0,3462	9,10455	1,10609	0,001051	1051,25	1051,91	34,5694	3,52608
9	3,162	1,19	6,765	0,860	0,467	0,052	0,03234	1,176	0,96052	0,00046	0,35207	9,5525	1,1444	0,001515	1515,08	1516,45	47,039	4,79798
10	3,240	1,18	6,702	0,855	0,483	0,053	0,03225	1,199	0,95589	0,00049	0,35006	9,39755	1,12848	0,001322	1321,58	1322,62	42,0387	4,28795

Tabel 4.4. Analisis optimasi non-linier untuk modifikasi Rumus "Ackers dan White"

Data :

$$\begin{aligned}
 B &= 4,5 & m. \\
 s &= 0,000124 \\
 G_s &= 2,48 \\
 V &= 1.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

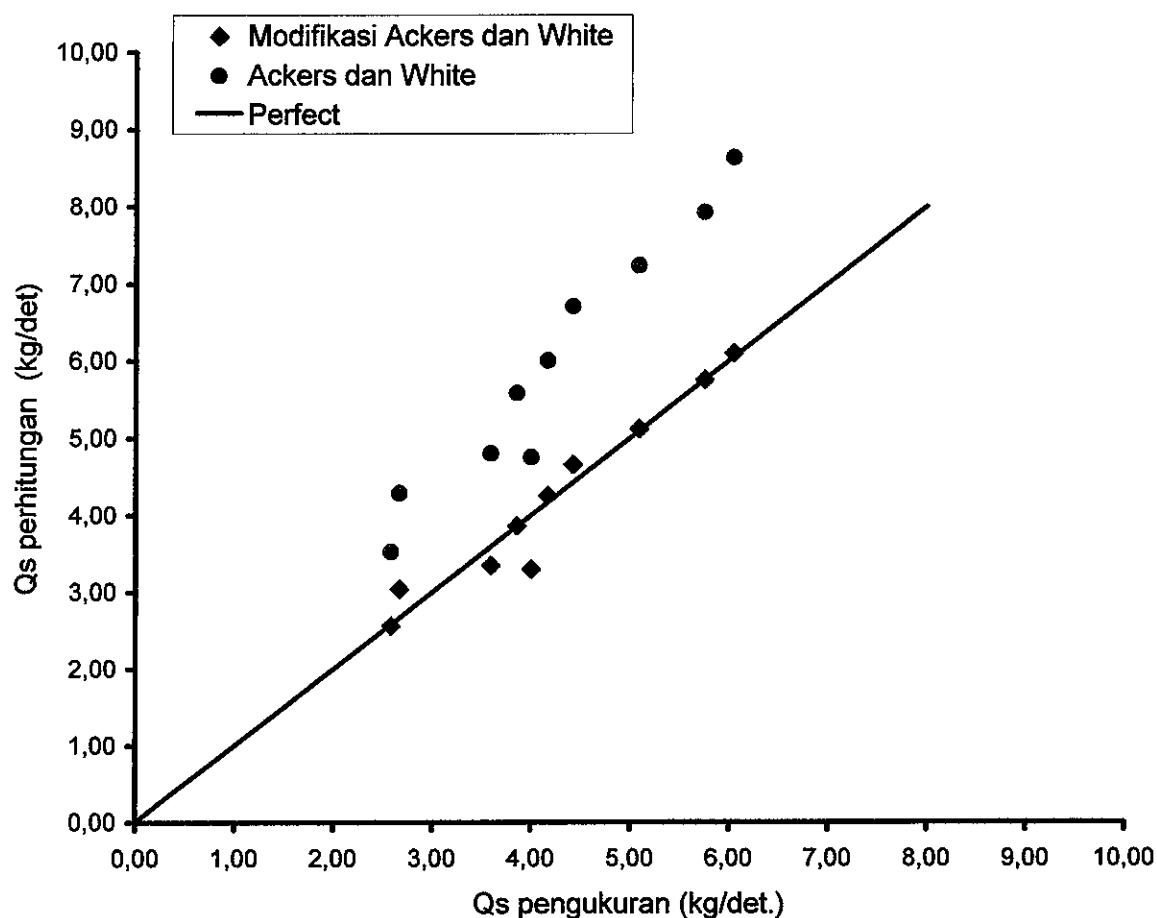
Persamaan modifikasi :

$$C_W = a C_{AW2} G \frac{d_s}{h} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^b u^c d_s^d$$

Koefisien yang dicari :

$$\begin{aligned}
 a &= 0,94132 \\
 b &= 1,05974 \\
 c &= 0,73354 \\
 d &= -0,0076
 \end{aligned}$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	h (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u _* (m/det)	d _*	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mg/l} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	3,144	1,19	6,771	0,861	0,464	0,052	0,03236	1,176	0,96052	0,00046	0,35207	9,5525	1,14459	0,001048	1048,14	1048,79	32,3476	3,29946
2	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,050	0,03237	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17661	0,001583	1583,39	1584,89	50,2037	5,12077
3	3,216	1,19	6,771	0,861	0,475	0,049	0,03236	1,108	0,97497	0,00039	0,35846	10,0553	1,19203	0,001893	1892,96	1895,10	59,7884	6,09842
4	3,137	1,19	6,765	0,860	0,464	0,050	0,03234	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17471	0,001483	1482,85	1484,16	45,6736	4,65871
5	3,347	1,19	6,783	0,862	0,493	0,050	0,03239	1,131	0,97006	0,00042	0,35627	9,881	1,17835	0,001716	1715,76	1717,52	56,3931	5,7521
6	3,128	1,19	6,771	0,861	0,462	0,051	0,03236	1,154	0,96524	0,00044	0,35414	9,71353	1,15947	0,001233	1233,04	1233,95	37,8645	3,86218
7	3,230	1,19	6,765	0,860	0,477	0,051	0,03234	1,154	0,96524	0,00044	0,35414	9,71353	1,16026	0,001315	1314,91	1315,95	41,6974	4,25314
8	3,350	1,19	6,771	0,861	0,495	0,055	0,03236	1,244	0,94688	0,00054	0,3462	9,10455	1,10609	0,000766	765,55	765,90	25,17	2,56734
9	3,162	1,19	6,765	0,860	0,467	0,052	0,03234	1,176	0,96052	0,00046	0,35207	9,5525	1,1444	0,001058	1057,64	1058,30	32,8278	3,34843
10	3,240	1,18	6,702	0,855	0,483	0,053	0,03225	1,199	0,95589	0,00049	0,35006	9,39755	1,12848	0,000937	937,09	937,61	29,8014	3,03974



Gambar 4.1. Korelasi angkutan sedimen total hasil perhitungan dengan hasil pengukuran menggunakan rumus Ackers dan White dan modifikasi Ackers dan White

Tabel 4.5. *Discrepancy ratio* (R_D) dan koefisien korelasi (C_c) antara Q_s pengukuran dan - Q_s perhitungan

	Ackers dan White	Modifikasi Ackers dan White
Discrepancy ratio R_D	0,71	1,00
Koefisien korelasi C_c	0,97	0,97

Rumus Ackers dan White Modifikasi tersebut selanjutnya digunakan untuk perhitungan angkutan sedimen total yang masuk dan keluar BPS seperti disajikan pada Tabel 4.6a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada kondisi debit bervariasi, Tabel 4.6b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada kondisi debit bervariasi, Tabel 4.7a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada kondisi debit disain dan Tabel 4.7b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan Rumus “Ackers dan White Modifikasi” pada kondisi debit disain.

4.1.9. Efisiensi Pengendapan Sedimen

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dilakukan sesuai dengan uraian pada sub bab 2.4. Perhitungan pada kondisi (*running*) debit bervariasi yang hasilnya akan digunakan untuk membuat persamaan/formulasi empirik dilakukan dengan menggunakan metode sedimentasi melalui persamaan angkutan sedimen total Ackers dan White Modifikasi. Perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.8. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode sedimentasi pada kondisi debit bervariasi.

Perhitungan efisiensi pada kondisi debit disain yang akan digunakan untuk validasi hasil formulasi empirik adalah hasil pengukuran, metode sedimentasi (rumus Ackers dan White modifikasi), Grafik Camp dan rumus Vetter. Hasil perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS

dengan menggunakan beberapa metode tersebut berturut-turut disajikan pada Tabel 4.9. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran pada kondisi debit disain, Tabel 4.10. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode sedimentasi (Ackers dan White) pada kondisi debit disain, Tabel 4.11. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Camp pada kondisi debit disain dan Tabel 4.12. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Vetter pada kondisi debit disain. Pada kondisi ini juga dihitung efisiensi pengendapan sedimen dengan menggunakan persamaan hasil formulasi empirik seperti disajikan pada Tabel 4.13. Perhitungan efisiensi dengan persamaan hasil formulasi empirik (4.3) pada kondisi debit disain.

Tabel 4.6a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan Rumus "Ackers dan White modifikasi" pada kondisi debit bervariasi

Data :

$B = 4,5$ m. Koefisien yang dicari : $a = 0,94132$
 $s = 0,000124$ $b = 1,05974$
 $G_s = 2,5$ $c = 0,73354$
 $V = 1,12 \times 10^{-6}$ m³/det $d = -0,0076$

Persamaan modifikasi :

$$C_w = a C_{AW2} G \frac{d_s}{h} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^b u^c d_s^d$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	h (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u _* (m/det)	d _*	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mg/l} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	1,046	0,88	4,752	0,680	0,220	0,051	0,02876	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,00085	0,000046	46,42	46,42	0,47637	0,04859
2	1,606	1,00	5,500	0,751	0,292	0,051	0,03021	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,06004	0,000168	168,23	168,25	2,65071	0,27037
3	2,070	1,08	6,021	0,797	0,344	0,051	0,03114	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,09744	0,000357	357,20	357,27	7,25501	0,74001
4	2,411	1,13	6,356	0,826	0,379	0,051	0,0317	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,1202	0,000556	555,57	555,76	13,1447	1,34076
5	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,051	0,03237	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15252	0,001199	1198,95	1199,82	38,006	3,87661
6	3,776	1,22	6,978	0,878	0,541	0,051	0,03267	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,16813	0,001783	1783,44	1785,35	66,1339	6,74566

Tabel 4.6b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan Rumus "Ackers dan White modifikasi" pada kondisi debit bervariasi

Data :

$B = 4,5$ m. Koefisien yang dicari : $a = 0,94132$
 $s = 0,000124$ $b = 1,05974$
 $G_s = 2,64$ $c = 0,73354$
 $V = 1,12 \times 10^{-6}$ m³/det $d = -0,0076$

Persamaan modifikasi :

$$C_w = a C_{AW2} G \frac{d_s}{h} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^b u^c d_s^d$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	h (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u _* (m/det)	d _*	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mg/l} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	1,046	0,88	4,752	0,680	0,220	0,051	0,02876	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	0,948	0,000023	23,14	23,14	0,23748	0,02422
2	1,606	1,00	5,500	0,751	0,292	0,051	0,03021	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,0057	0,000086	85,65	85,66	1,3495	0,13765
3	2,070	1,08	6,021	0,797	0,344	0,051	0,03114	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,04215	0,000184	183,78	183,80	3,73241	0,38071
4	2,411	1,13	6,356	0,826	0,379	0,051	0,0317	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,06435	0,000287	287,49	287,54	6,80097	0,6937
5	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,051	0,03237	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09667	0,000631	630,77	631,01	19,9883	2,0388
6	3,776	1,22	6,978	0,878	0,541	0,051	0,03267	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,11247	0,000947	947,21	947,75	35,107	3,58092

Tabel 4.7a. Perhitungan angkutan sedimen yang masuk BPS menggunakan Rumus "Ackers dan White Modifikasi" pada kondisi debit disain

Data :

$B = 4,5$ m. Koefisien yang dicari : $a = 0,94132$
 $S = 0,000124$ $b = 1,05974$
 $G_s = 2,5$ $c = 0,73354$
 $V = 1,12 \times 10^{-3}$ m³/det $d = -0,0076$

Persamaan modifikasi :

$$C_w = a C_{AW2} G \frac{d_s}{h} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^b u^c d_s^d$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	h (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u* (m/det)	d _s	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mgt} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	3,144	1,19	6,771	0,861	0,464	0,051	0,03236	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15098	0,001127	1127,30	1128,06	34,7923	3,54881
2	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,051	0,03237	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15252	0,001199	1198,95	1199,82	38,006	3,87661
3	3,216	1,19	6,771	0,861	0,475	0,051	0,03236	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15194	0,001187	1186,88	1187,73	37,4715	3,82209
4	3,137	1,19	6,765	0,860	0,464	0,051	0,03234	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15049	0,001121	1121,11	1121,86	34,5241	3,52146
5	3,347	1,19	6,783	0,862	0,493	0,051	0,03239	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15446	0,001302	1302,21	1303,23	42,7904	4,36462
6	3,128	1,19	6,771	0,861	0,462	0,051	0,03236	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,1508	0,001117	1116,64	1117,39	34,2878	3,49736
7	3,230	1,19	6,765	0,860	0,477	0,051	0,03234	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15163	0,001191	1191,32	1192,17	37,7755	3,8531
8	3,350	1,19	6,771	0,861	0,495	0,051	0,03236	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15365	0,001300	1299,50	1300,52	42,7396	4,35943
9	3,162	1,19	6,765	0,860	0,467	0,051	0,03234	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,15075	0,001137	1137,10	1137,88	35,2961	3,6002
10	3,240	1,18	6,702	0,855	0,483	0,051	0,03225	1,159	0,96415	0,00045	0,35366	9,67615	1,14897	0,001181	1180,92	1181,76	37,5616	3,83128

Tabel 4.7b. Perhitungan angkutan sedimen yang keluar BPS menggunakan Rumus "Ackers dan White Modifikasi" pada kondisi debit disain

Data :

$$G_s = 2,64$$

PENGALIRAN KE	Q (m ³ /det)	h (m)	A (m ²)	R (m)	u (m/det)	ds (mm)	u* (m/det)	d _s	C _{AW1}	C _{AW2}	C _{AW3}	C _{AW4}	C _{AW5}	C _w	C _{ppm} (ppm)	C _{mgt} (mg/l)	Q _s (N/det)	Q _s (kg/det)
1	3,144	1,19	6,771	0,861	0,464	0,051	0,03236	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09501	0,000592	591,77	591,98	18,2583	1,86234
2	3,229	1,19	6,777	0,862	0,476	0,051	0,03237	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09667	0,000631	630,77	631,01	19,9883	2,0388
3	3,216	1,19	6,771	0,861	0,475	0,051	0,03236	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09611	0,000624	624,36	624,59	19,7053	2,00994
4	3,137	1,19	6,765	0,860	0,464	0,051	0,03234	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09454	0,000589	588,57	588,78	18,1192	1,84816
5	3,347	1,19	6,783	0,862	0,493	0,051	0,03239	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09879	0,000687	687,19	687,48	22,5726	2,30241
6	3,128	1,19	6,771	0,861	0,462	0,051	0,03236	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,0948	0,000586	585,95	586,16	17,9866	1,83464
7	3,230	1,19	6,765	0,860	0,477	0,051	0,03234	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09585	0,000627	626,99	627,22	19,8744	2,02719
8	3,350	1,19	6,771	0,861	0,495	0,051	0,03236	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09806	0,000686	686,13	686,42	22,5581	2,30092
9	3,162	1,19	6,765	0,860	0,467	0,051	0,03234	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09485	0,000597	597,32	597,53	18,535	1,89057
10	3,240	1,19	6,702	0,852	0,483	0,051	0,03219	1,194	0,95692	0,00048	0,35051	9,43185	1,09158	0,000609	609,32	609,54	19,3739	1,97613

Tabel 4.8. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode sedimentasi kondisi debit bervariasi

No.	Angkutan sedimen masuk Qi		Angkutan sedimen keluar Qo		Qs (= Qi-Qo) (m ³ /7 hari)	Efisiensi	
	(kg/det)	(m ³ /7 hari)	(kg/det)	(m ³ /7 hari)		Ep	Ep (%)
1	0,0486	20,9909	0,0242	10,4644	10,5265	0,5015	50,15
2	0,2704	116,8010	0,1376	59,4645	57,3365	0,4909	49,09
3	0,7400	319,6850	0,3807	164,4648	155,2202	0,4855	48,55
4	1,3408	579,2078	0,6937	299,6781	279,5297	0,4826	48,26
5	3,8766	1674,6944	2,0388	880,7623	793,9320	0,4741	47,41
6	6,7457	2914,1231	3,5809	1546,9559	1367,1671	0,4692	46,92

Tabel 4.9. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran kondisi debit disain

No.	Angkutan sedimen masuk Qi		Angkutan sedimen keluar Qo		dQs (= Qi-Qo) (m ³ /7 hari)	Efisiensi	
	(kg/det)	(m ³ /7 hari)	(kg/det)	(m ³ /7 hari)		Eff.	Eff. (%)
1	4,0015	1728,6392	1,9886	859,0666	869,5726	0,5030	50,30
2	5,0908	2199,2394	2,6814	1158,3482	1040,8912	0,4733	47,33
3	6,0467	2612,1782	2,9323	1266,7747	1345,4036	0,5151	51,51
4	4,4215	1910,0898	2,1150	913,6651	996,4248	0,5217	52,17
5	5,7521	2484,8907	3,1147	1345,5583	1139,3324	0,4585	45,85
6	3,8554	1665,5470	1,8486	798,6159	866,9311	0,5205	52,05
7	4,1675	1800,3567	2,0326	878,1000	922,2567	0,5123	51,23
8	2,5824	1115,5993	1,3876	599,4302	516,1691	0,4627	46,27
9	3,5929	1552,1282	1,8501	799,2372	752,8910	0,4851	48,51
10	2,6681	1152,6094	1,4920	644,5526	508,0567	0,4408	44,08

Tabel 4.10. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode sedimentasi (Ackers dan White) kondisi debit disain

No.	Angkutan sedimen masuk Qi		Angkutan sedimen keluar Qo		Qs (= Qi-Qo) (m ³ /7 hari)	Efisiensi	
	(kg/det)	(m ³ /7 hari)	(kg/det)	(m ³ /7 hari)		Ep	Ep (%)
1	3,5488	1533,0874	1,8623	804,5328	728,5546	0,4752	47,52
2	3,8766	1674,6944	2,0388	880,7623	793,9320	0,4741	47,41
3	3,8221	1651,1447	2,0099	868,2945	782,8503	0,4741	47,41
4	3,5215	1521,2693	1,8482	798,4037	722,8656	0,4752	47,52
5	4,3646	1885,5177	2,3024	994,6398	890,8779	0,4725	47,25
6	3,4974	1510,8595	1,8346	792,5633	718,2962	0,4754	47,54
7	3,8531	1664,5389	2,0272	875,7455	788,7934	0,4739	47,39
8	4,3594	1883,2758	2,3009	993,9982	889,2776	0,4722	47,22
9	3,6002	1555,2883	1,8906	816,7262	738,5621	0,4749	47,49
10	3,8313	1655,1122	1,9761	853,6898	801,4224	0,4842	48,42

Tabel 4.11. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Camp kondisi debit disain

Data Bangunan Penangkap Sedimen (BPS) :

Panjang, $L = 120$ m.

Lebar kantong, $B1 = 5$ m.

Kecepatan endap, $\omega_o = 0,004$ m/det.

No.	TANGGAL PENGUKURAN	B ₂ (m)	B Rerata (m)	LB (m ²)	H (m)	V _o (m/det)	Q (m ³ /det)	d _s (mm)	ω (m/det)	$\frac{\omega}{\omega_o}$	$\frac{\omega}{V_o}$	Efisiensi	
												Ep	Ep (%)
1	21-2-2004	7,39	6,20	743,40	2,40	0,234	3,138	0,052	0,00250	0,6250	0,0107	0,540	54,00
2	21-2-2004	7,41	6,21	744,60	2,39	0,241	3,226	0,050	0,00220	0,5500	0,0091	0,490	49,00
3	21-2-2004	7,40	6,20	744,00	2,32	0,246	3,208	0,049	0,00210	0,5250	0,0085	0,470	47,00
4	24-2-2004	7,40	6,20	744,00	2,30	0,242	3,131	0,050	0,00220	0,5500	0,0091	0,490	49,00
5	24-2-2004	7,43	6,22	745,80	2,25	0,263	3,342	0,050	0,00220	0,5500	0,0084	0,485	48,50
6	24-2-2004	7,37	6,19	742,20	2,10	0,262	3,124	0,051	0,00230	0,5750	0,0088	0,510	51,00
7	25-2-2004	7,41	6,21	744,60	2,05	0,276	3,228	0,051	0,00230	0,5750	0,0083	0,505	50,50
8	25-2-2004	7,43	6,22	745,80	2,00	0,292	3,346	0,055	0,00290	0,7250	0,0099	0,605	60,50
9	26-2-2004	7,40	6,20	744,00	1,76	0,308	3,158	0,052	0,00250	0,6250	0,0081	0,540	54,00
10	26-2-2004	7,42	6,21	745,20	1,66	0,331	3,232	0,053	0,00270	0,6750	0,0082	0,565	56,50

Tabel 4.12. Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan metode Vetter kondisi debit disain

Data Bangunan Penangkap Sedimen (BPS) :

Panjang, $L = 120$ m.

Lebar kantong, $B1 = 5$ m.

No.	TANGGAL PENGUKURAN	B ₂ (m)	B Rerata (m)	LB (m ²)	H (m)	V _o (m/det)	Q (m ³ /det)	d _s (mm)	ω (m/det)	Ep	
											(%)
1	21-2-2004	7,39	6,195	743,4	2,4	0,234	3,138	0,052	0,00250	0,4469	44,69
2	21-2-2004	7,41	6,205	744,6	2,39	0,241	3,226	0,050	0,00220	0,3982	39,82
3	21-2-2004	7,4	6,2	744	2,32	0,246	3,208	0,049	0,00210	0,3856	38,56
4	24-2-2004	7,4	6,2	744	2,3	0,242	3,131	0,050	0,00220	0,4071	40,71
5	24-2-2004	7,43	6,215	745,8	2,25	0,263	3,342	0,050	0,00220	0,3879	38,79
6	24-2-2004	7,37	6,185	742,2	2,1	0,262	3,124	0,051	0,00230	0,4210	42,10
7	25-2-2004	7,41	6,205	744,6	2,05	0,276	3,228	0,051	0,00230	0,4117	41,17
8	25-2-2004	7,43	6,215	745,8	2	0,292	3,346	0,055	0,00290	0,4761	47,61
9	26-2-2004	7,4	6,2	744	1,76	0,308	3,158	0,052	0,00250	0,4451	44,51
10	26-2-2004	7,42	6,21	745,2	1,66	0,331	3,232	0,053	0,00270	0,4634	46,34

4.1.10. Formulasi Empirik Efisiensi Pengendapan sedimen di BPS

Berdasarkan data dan perhitungan hasil penelitian pengendapan sedimen di BPS pada kondisi (*running*) debit bervariasi, maka dapat dibuat suatu persamaan (formulasi empirik). Variabel yang akan digunakan diambil dari parameter yang diukur dalam penelitian ini yaitu meliputi V, H, B, L, C dan ds. Sedangkan parameter yang dihasilkan dari perhitungan adalah Q, Qs, ω , dan Ep. Dari data tersebut dicoba dibuat hubungan tiga (3) parameter Q, C, dan ds dalam suatu persamaan untuk menentukan efisiensi bangunan penangkap sedimen (Ep) yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$E = f \{Q, C, ds\} \quad (4.1)$$

Suatu model persamaan regresi *non-linier* dapat digunakan untuk menghitung efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen berdasarkan fungsi parameter-parameter diatas yaitu :

$$E = a_0 \cdot Q^{a_1} \cdot C^{a_2} \cdot ds^{a_3} \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan analisis statistik diperoleh koefisien-koefisien persamaan regresi tersebut, yaitu :

$$a_0 = 50,93$$

$$a_1 = -0,04835$$

$$a_2 = -0,03333$$

$$a_3 = 0,00067$$

Sehingga rumus yang dihasilkan dari formulasi empirik untuk mencari harga efisiensi suatu bangunan penangkap sedimen tersebut adalah sebagai berikut :

$$E_p = 50,93 \cdot Q^{-0,04835} \cdot C^{-0,03333} \cdot ds^{0,00067} \quad (4.3)$$

Dengan koefisien korelasi $RM = 0.9985$

Perhitungan statistik untuk formulasi ini disajikan pada Lampiran D. Analisis statistik Model regresi berpangkat berganda (*nonlinier*).

Dengan menggunakan persamaan diatas (4.3), maka dapat dihitung efisiensi pengendapan sedimen di BPS pada kondisi debit disain seperti disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.13. Perhitungan efisiensi dengan persamaan hasil formulasi empirik pada kondisi debit disain

Parameter	Satuan	Data hasil pengukuran lapangan sesuai urutan <i>running</i>									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Debit (Q)	m ³ /det.	3,138	3,226	3,208	3,131	3,342	3,124	3,228	3,346	3,158	3,232
Konsentrasi (C)	g/l	1,259	1,563	1,866	1,3955	1,7053	1,2197	1,2768	0,7593	1,1237	0,8127
Diameter (ds)	mm	0,052	0,050	0,049	0,050	0,050	0,051	0,051	0,055	0,052	0,053
Efisiensi (Ep)	%	48,47	48,75	49,05	48,64	48,81	48,42	48,42	47,51	48,27	47,70

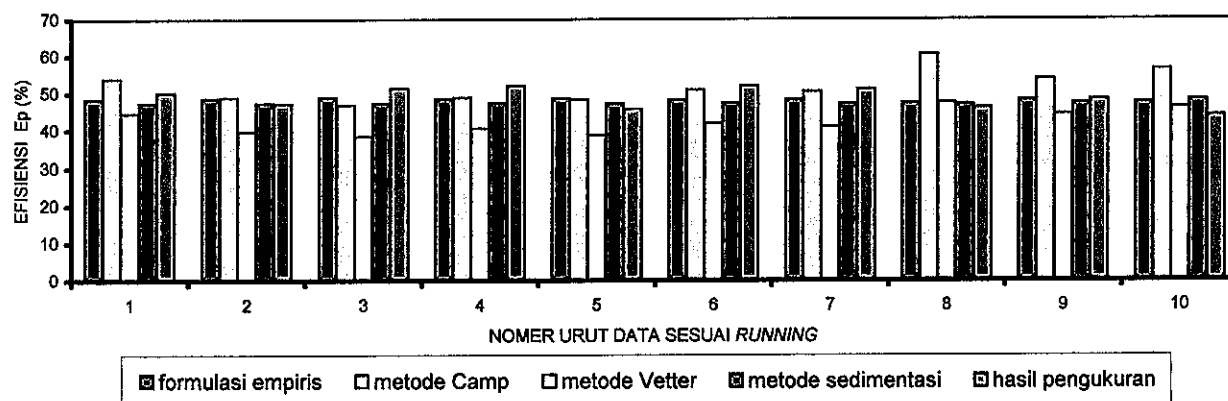
4.1.11. Validasi Hasil Formulasi Empiris

Guna memperoleh hasil yang mendekati benar maka persamaan hasil formulasi empiris perlu diuji terhadap nilai efisiensi pengendapan sedimen yang diperoleh berdasarkan data pengukuran secara langsung dan hasilnya dibandingkan dengan metode yang lain, yaitu metode Grafik Camp, rumus Vetter dan metode angkutan sedimen.

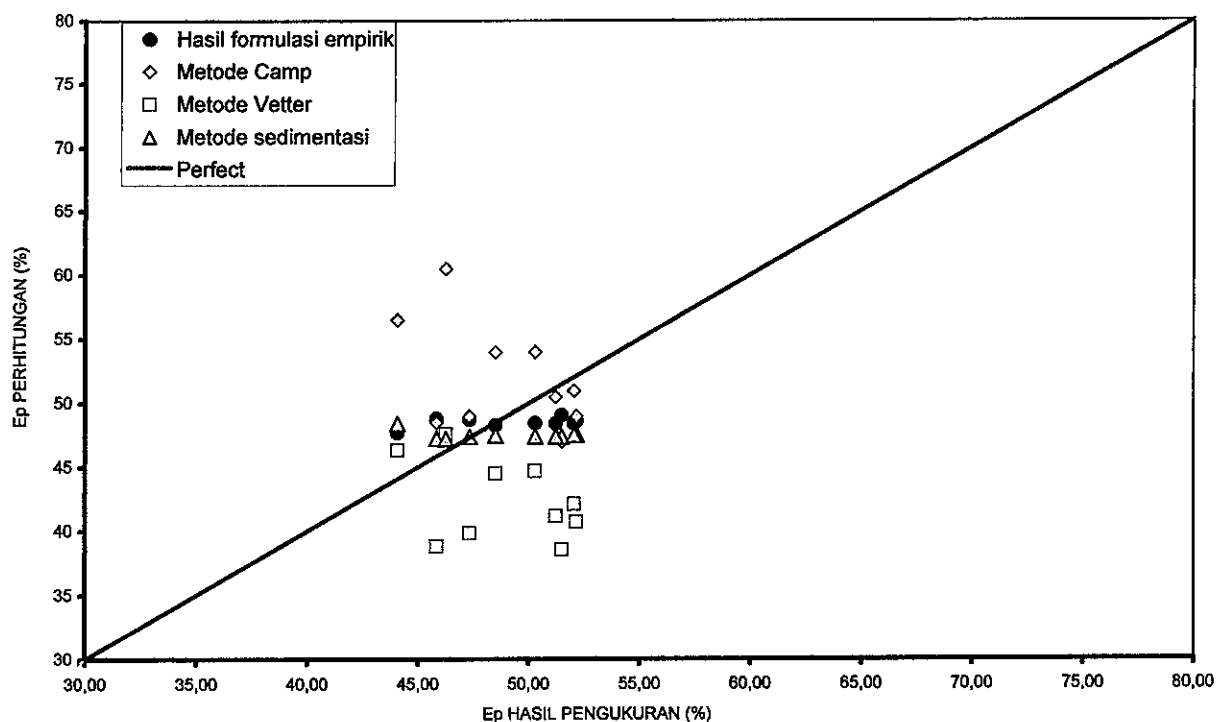
Pada bagian terdahulu telah dibahas bahwa data penelitian untuk kondisi debit bervariasi dipergunakan untuk analisis statistik guna mendapatkan persamaan atau formulasi secara empirik. Sedangkan untuk validasi dipergunakan data penelitian hasil *running* kondisi debit disain. Hasil perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS untuk validasi disajikan pada Tabel 4.14., Gambar 4.2. dan Gambar 4.3. berikut.

Tabel 4.14. Perbandingan nilai Efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran dan perhitungan dengan formulasi empirik, Grafik Camp dan Rumus Vetter

Metode Perhitungan Efisiensi (Ep)	Satuan	Hasil perhitungan Efisiensi menggunakan data <i>running</i> kondisi debit disain									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
- Formulasi Empiris	%	48,47	48,75	49,05	48,64	48,81	48,42	48,42	47,51	48,27	47,70
- Metoda Camp	%	54,00	49,00	47,00	49,00	48,50	51,00	50,50	60,50	54,00	56,50
- Metode Vetter	%	44,69	39,82	38,56	40,71	38,79	42,10	41,17	47,61	44,51	46,34
- Metoda sedimentasi	%	47,42	47,41	47,41	47,52	47,25	47,54	47,39	47,22	47,49	48,42
- Hasil pengukuran	%	50,30	47,33	51,51	52,17	45,85	52,05	51,23	46,27	48,51	44,08



Gambar 4.2. Perbandingan nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran dan perhitungan dengan beberapa metode (barchart)



Gambar 4.3. Perbandingan nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil pengukuran dan perhitungan dengan beberapa metode (grafik)

4.2. Pembahasan

1). Perbandingan nilai efisiensi

Dari penelitian ini telah dibuat suatu persamaan hasil formulasi empirik seperti diuraikan pada sub bab 4.1.10. Dengan persamaan tersebut dapat dihitung nilai efisiensi pengendapan sedimen di BPS pada kondisi disain. Selanjutnya hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran dan beberapa metode perhitungan yang lain seperti disajikan pada Tabel 4.14. diatas. Berdasarkan tabel tersebut dapat dijelaskan bahwa :

- Hasil perhitungan efisiensi dengan menggunakan Grafik Camp memberikan nilai yang tertinggi, diikuti dibawahnya berturut-turut oleh persamaan formulasi empirik dan metode angkutan sedimen.
- Persamaan Vetter memberikan nilai yang paling rendah.
- Persamaan hasil formulasi empirik memberikan nilai yang paling mendekati hasil pengukuran dengan nilai *discrepancy ratio* rerata $R_D = 0,99$.

2). Uji persamaan dengan analisis regresi

Hasil perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS dengan beberapa metode kemudian dianalisis dengan menggunakan regresi linier seperti disajikan pada Gambar 4.3. Secara grafis dapat dilihat perbandingan nilai efisiensi yang telah dihitung dan dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Hasil perhitungan efisiensi dengan menggunakan Grafik Camp memberikan nilai yang tertinggi.
- Persamaan Vetter memberikan nilai yang paling rendah.
- Persamaan hasil formulasi empirik dan metode angkutan sedimen memberikan nilai hampir mendekati hasil pengukuran seperti ditunjukkan oleh titik *plotting* yang hampir berimpit dengan garis *perfect*.

3). Hubungan antara Efisiensi dengan beberapa parameter

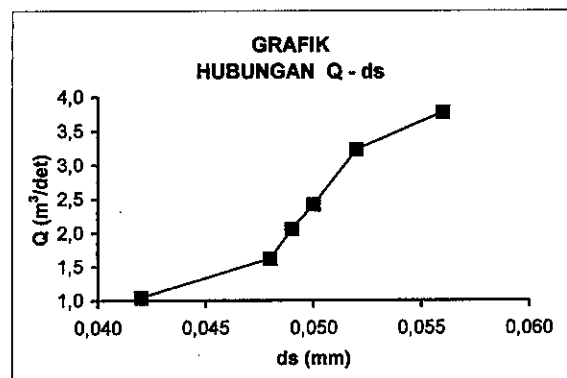
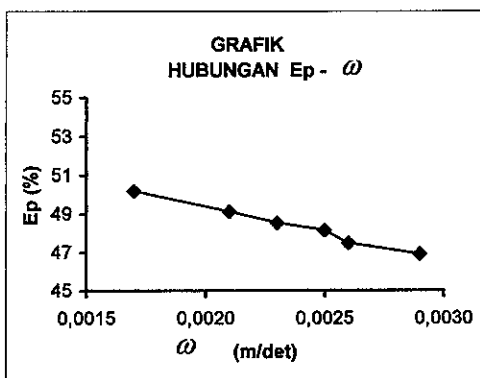
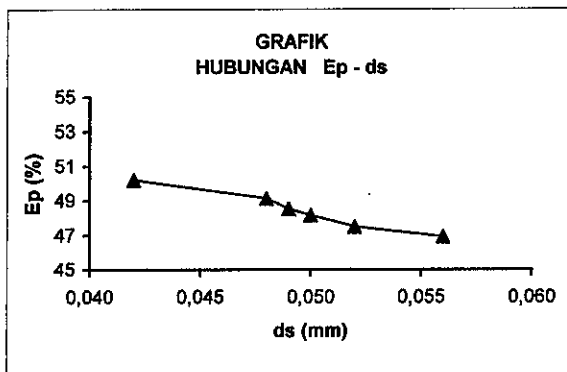
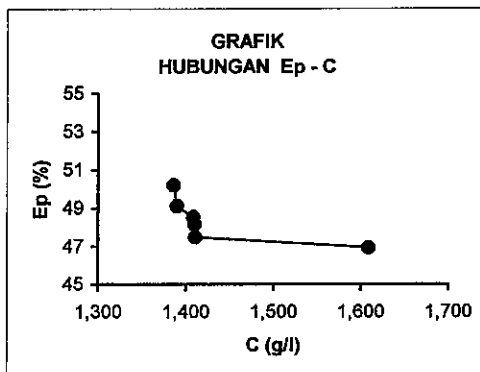
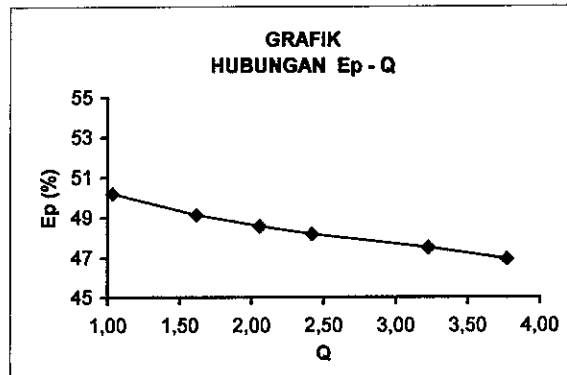
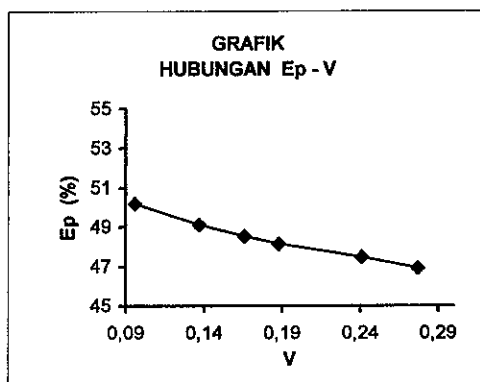
Dari hasil pengukuran beberapa parameter hidrolis dan karakteristik sedimen serta perhitungan efisiensi pengendapan sedimen (E_p) dengan menggunakan metode formulasi empirik maka dapat dibuat suatu hubungan antar data tersebut seperti diperlihatkan pada Tabel 4.15 dan Gambar 4.4.

Dapat dijelaskan bahwa debit (Q) dan kecepatan (V) aliran mempunyai pengaruh yang cukup kuat terhadap efisiensi pengendapan sedimen di BPS (E_p). Pada suatu BPS yang telah dirancang dengan ukuran tertentu, maka apabila debit yang dialirkan lebih besar daripada debit disain, efisiensinya akan menurun dan sebaliknya bila debit yang dialirkan lebih kecil daripada debit disain, efisiensinya akan lebih tinggi. Hal ini terlihat dengan jelas pada grafik hubungan antara efisiensi dengan debit. Faktor debit ini juga berpengaruh sangat kuat terhadap butiran sedimen yang terangkut aliran. Dari hasil pengukuran terlihat bahwa semakin besar debit aliran, semakin besar pula diameter butiran sedimen yang terangkut aliran. Sehingga pengaruh debit aliran ini sangat dominan terhadap diameter butiran sedimen yang terangkut dan kondisi ini sangat mempengaruhi efisiensi pengendapan sedimen di BPS.

Dari tabel tersebut juga dapat dijelaskan bahwa semakin besar debit aliran berarti semakin besar pula kecepatan alirannya. Dengan demikian kecepatan aliran ini juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi. Menurut Grafik Camp yang menggunakan faktor kecepatan aliran dalam perhitungan efisiensi, dapat dijelaskan bahwa kecepatan aliran mempengaruhi nilai efisiensi, yaitu semakin besar kecepatan aliran maka semakin kecil efisiensinya. Sedangkan menurut persamaan Vetter yang menggunakan faktor debit aliran dalam perhitungan

Tabel 4.15. Hubungan antara Efisiensi (metode Formulasi Empirik) dengan beberapa parameter aliran dan sedimen

No.	B Rerata (m)	LB (m ²)	H (m)	V _o (m/det)	Q (m ³ /det)	C (g/l)	d _s (mm)	ω (m/det)	Ep (%)
1	5,88	705,00	2,01	0,096	1,036	1,3867	0,042	0,0017	50,19
2	6,00	720,00	2,16	0,137	1,619	1,3901	0,048	0,0021	49,11
3	6,08	729,00	2,25	0,166	2,057	1,4088	0,049	0,0023	48,53
4	6,13	735,00	2,32	0,188	2,420	1,4104	0,050	0,0025	48,15
5	6,21	744,00	2,39	0,241	3,227	1,4112	0,052	0,0026	47,48
6	6,21	745,00	2,43	0,277	3,773	1,6089	0,056	0,0029	46,92



Gambar 4.4. Grafik hubungan Efisiensi (metode Formulasi Empirik) dengan beberapa parameter aliran dan sedimen

efisiensi, diketahui bahwa semakin besar debit aliran, maka semakin kecil efisiensinya.

Konsentrasi sedimen (C) juga mempunyai pengaruh terhadap efisiensi seperti ditunjukkan oleh grafik hubungan antara E_p dan C. Hubungan yang ada menunjukkan bahwa semakin besar nilai C, maka semakin kecil nilai efisiensi yang terjadi. Konsentrasi sedimen ini terutama sangat berpengaruh terhadap kecepatan endap butiran sedimen (ω).

4). Tinjauan terhadap data perencanaan

Perhitungan efisiensi pengendapan sedimen di BPS yang dihitung dengan beberapa metode menunjukkan adanya kemiripan atau kesesuaian seperti ditunjukkan pada bagian terdahulu (sub bab 4.1.11). Sehingga hasil perhitungan tersebut dapat digunakan untuk menentukan efisiensi pengendapan sedimen di BPS yang diteliti.

Bila dibandingkan dengan perhitungan efisiensi yang dihasilkan pada tahap perencanaan, maka dapat diketahui bahwa efisiensi BPS pada saat penelitian mempunyai nilai yang lebih kecil yaitu rerata dari seluruh metode mempunyai nilai $E_p = 47,59 \%$, sedangkan pada kondisi perencanaan $E_p = 68 \%$.

Dari tabel perhitungan terlihat adanya perbedaan beberapa parameter yang digunakan dalam perhitungan efisiensi. Perbedaan tersebut ternyata juga menimbulkan perbedaan nilai efisiensinya.

Efisiensi yang diperoleh dari hasil perhitungan yang sama, yaitu metode grafik Camp antara hasil perencanaan (*design*) dengan hasil penelitian mempunyai perbedaan nilai yang cukup besar. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai parameter yang digunakan dalam perhitungan. Dari tiga (3) parameter yang

digunakan untuk perhitungan yaitu kecepatan aliran (v), kecepatan endap rancangan (ω_o) dan kecepatan endap diluar partikel rancangan (ω), terdapat perbedaan nilai yang cukup besar.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan data hasil penelitian (pengukuran) diketahui parameter kecepatan v , ω dan ω_o masing-masing mempunyai nilai rerata 0,270 , 0.0022 dan 0,0047, sedangkan estimasi pada saat perencanaan masing-masing ditetapkan dengan nilai 0,495 , 0,004 dan 0,0049. Faktor utama yang sangat berpengaruh sehingga menyebabkan terjadinya perbedaan tersebut diatas adalah penetapan diameter sedimen yang akan diendapkan. Dalam perencanaan (desain) oleh Konsultan (1996), diameter sedimen ds ditetapkan berdasarkan Kriteria Perencanaan yang ada yaitu 0.07 mm.

Sedangkan hasil penelitian (pengukuran) diketahui diameter sedimen rerata mempunyai ukuran yang lebih kecil yaitu 0.051 mm. Sesuai dengan metode perhitungan yang ada, maka kondisi ini menyebabkan kecepatan endap partikel sedimen ω juga menjadi lebih kecil. Hal ini memberikan nilai efisiensi yang lebih kecil pula. Faktor lain yang menyebabkan perbedaan adalah penetapan parameter aliran yang digunakan untuk perhitungan. Dalam perhitungan yang dilakukan Konsultan dengan menggunakan rumus Manning, tinggi h ataupun luas basah penampang melintang aliran A diasumsikan sesuai dengan kondisi aliran normal, yaitu dasar saluran diambil pada kondisi kantong sedimen telah penuh. Sedangkan dalam penelitian ini tinggi dan luas basah penampang aliran di bangunan penangkap sedimen dihitung pada kondisi tidak penuh tetapi sesuai dengan kondisi permukaan endapan yang ada, sehingga tinggi aliran mempunyai nilai yang lebih besar dan kecepatan aliran mempunyai nilai yang lebih rendah.

Berdasarkan rumus yang ada, nilai h yang besar memberikan nilai ω_p yang kecil sehingga efisiensi pengendapan sedimen menjadi kecil. Pada sisi yang lain nilai v yang kecil menghasilkan efisiensi pengendapan sedimen yang besar. Secara bersamaan dalam perhitungan, perbedaan ketiga parameter tersebut menyebabkan perbedaan nilai efisiensi.

Ketiga parameter yang berpengaruh terhadap efisiensi pengendapan sedimen seperti diuraikan diatas, secara ringkas dapat dijelaskan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.16. Parameter untuk perhitungan efisiensi pengendapan sedimen metode Camp

No.	Parameter	Satuan	Hasil-Disain	Hasil-Penelitian	Pengaruh terhadap Efisiensi-pengendapan sedimen
1	Diameter sedimen, d_s	mm	0.007	0.051	efisiensi turun
2	Kecepatan endap, ω	m/det.	0.004	0.0022	efisiensi turun
3	Kecepatan endap-rencana, ω_0	m/det.	0.0049	0.0047	efisiensi naik
4	Kecepatan alran, v	(m ³ /det)	0.495	0.270	efisiensi naik

Adapun efisiensi pengendapan sedimen yang dihitung berdasarkan data hasil penelitian pada kondisi disain dengan metode yang lain, mempunyai nilai yang hampir sama. Nilai efisiensi yang dihitung menggunakan metode lain berdasarkan data dari penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih kecil bila dibandingkan dengan metode Camp hasil pekerjaan perencanaan. Hal ini terutama disebabkan oleh beberapa faktor antara lain adalah :

- a. Ukuran partikel sedimen dominan yang terangkut dalam aliran air (data lapangan/hasil pengukuran) mempunyai ukuran kecil, yaitu 99 % merupakan sedimen dengan ukuran lebih kecil dari 0.07 mm ($d_{50} = 0,051$ mm). Dan sisanya (1%) adalah material sedimen dengan diameter lebih besar dari 0,075

mm. Sedangkan berdasarkan data disain oleh Konsultan (1995), BPS dirancang (dihitung) berdasarkan kriteria untuk partikel sedimen dengan ukuran lebih besar dari 0,07 mm.

- b. Hal diatas (pada butir 1) menyebabkan sedimen tetap berada pada kondisi tersuspensi dan butiran yang telah mengendap mudah tersuspensi dan terbawa aliran keluar BPS yang berarti masuk ke dalam saluran irigasi.

Meskipun pada dasarnya material endapan yang merugikan adalah berupa pasir atau material dengan fraksi yang lebih besar, tetapi kenyataan yang ada di lapangan menunjukkan bahwa material yang lebih halus atau lebih kecil ukurannya dari 0,06 mm lebih banyak yang mengendap di saluran irigasi utama (induk dan sekunder) sehingga kondisi tersebut menimbulkan penurunan kapasitas pengaliran pada saluran irigasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan tesis yang mengambil obyek penelitian di Daerah Irigasi Penggaron Kanan (Bendung Pucanggading) sebagai studi kasus ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menghitung angkutan sedimen total dengan Rumus Ackers dan White perlu dimodifikasi sehingga sesuai untuk diterapkan di lokasi penelitian.

Rumus tersebut dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_W = 0,941 C_{AW2} G \frac{d_s}{d} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{C_{AW1}} \left(\frac{C_{AW5}}{C_{AW3}} - 1 \right)^{C_{AW4}} h^{1,06} u^{0,734} d_s^{-0,008}$$

Dari hasil pengujian dengan pendekatan statistik melalui perbandingan dan korelasi antara angkutan sedimen total hasil pengukuran dan hitungan diperoleh nilai $R_D = 1,00$ dan $C_c = 0,97$.

2. Diperoleh suatu persamaan untuk menghitung efisiensi pengendapan sedimen di BPS hasil formulasi empirik sebagai berikut :

$$Ep = 50,93 Q^{-0,04835} \cdot C^{-0,03333} \cdot ds^{0,00067}$$

Dengan koefisien korelasi $RM = 0.9985$

Berdasarkan uji persamaan menggunakan data hasil pengukuran, persamaan hasil formulasi empirik ini hasilnya lebih mendekati dibandingkan dengan persamaan lainnya.

Mengingat data penelitian hanya diambil dari satu obyek sebagai studi kasus, maka persamaan tersebut belum bisa dipakai secara umum. Tetapi sangat

bermanfaat untuk mengukur efisiensi pengendapan sedimen di BPS bersangkutan, terutama untuk menyesuaikan pedoman operasi BPS tersebut.

3. Nilai efisiensi pengendapan sedimen pada bangunan penangkap sedimen yang dihitung berdasarkan data hasil penelitian ini mempunyai nilai yang lebih kecil dibandingkan nilai efisiensi yang dihitung menurut perencanaan PT Gracia Widyakarsa (1996) yaitu berturut-turut 47,85% dan 68% sehingga terdapat perbedaan nilai yang cukup besar. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa bangunan penangkap sedimen yang ada mempunyai efektivitas (keberhasilan guna/fungsi) yang rendah dalam mengendapkan sedimen yang akan masuk ke saluran irigasi. Faktor utama yang menyebabkan rendahnya efektivitas bangunan tersebut adalah kandungan sedimen yang terangkut aliran sebagian besar (dominan) mempunyai ukuran partikel yang relatif kecil, yaitu berupa lanau dengan ukuran lebih kecil dari 0,07 mm. Sehingga material ini mudah tersuspensi dan terbawa aliran ke saluran irigasi.

Ukuran partikel sedimen yang digunakan untuk perhitungan dalam penelitian ini (butir 2) merupakan hasil pengukuran dan analisis laboratorium dimana kondisinya berbeda dengan asumsi yang diambil dalam perencanaan (disain bangunan). Pada tahap perencanaan, penentuan ukuran partikel sedimen tidak didasarkan pada hasil penelitian dan analisis laboratorium, tetapi berdasarkan asumsi seperti disarankan dalam Kriteria Perencanaan (KP). BPS seperti diuraikan dalam KP tersebut memang dirancang untuk mengendapkan fraksi pasir halus dengan ukuran antara 0,06 sampai dengan 0,07 mm.

Meskipun pada dasarnya material endapan yang merugikan adalah berupa pasir atau material dengan fraksi yang lebih besar, tetapi kenyataan yang ada di lapangan menunjukkan bahwa material yang lebih halus atau lebih kecil ukurannya dari 0,06 mm lebih banyak yang mengendap di saluran irigasi (induk dan sekunder) sehingga kondisi tersebut menimbulkan penurunan kapasitas pengaliran pada saluran irigasi dan secara lebih luas merugikan kegiatan eksploitasi dan pemeliharannya.

4. Efektivitas BPS dalam mengendapkan sedimen dapat diukur dengan nilai efisiensi pengendapan sedimennya. Parameter-parameter yang mempengaruhi nilai efisiensi tersebut terutama adalah perubahan debit aliran, ukuran partikel sedimen yang terangkut aliran, kecepatan aliran dan kecepatan endap partikel sedimen.
5. Dengan mengetahui nilai efisiensi hasil penelitian, maka dapat dihitung jumlah (volume) sedimen yang akan mengendap di BPS. Sehingga dapat dilakukan penyesuaian pengoperasian bangunan, terutama penetapan periode waktu untuk pengurasan sedimen dari BPS agar tidak mengganggu fungsi jaringan irigasi secara keseluruhan.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Diperlukan penelitian serupa pada obyek yang lain yang lebih banyak, terutama pada sungai dan jaringan irigasi yang kondisinya bervariasi sehingga dapat diambil kesimpulan yang lebih sempurna.

2. Dalam merencanakan (mendisain) BPS pada jaringan irigasi sebaiknya dilakukan survai dan penyelidikan karakteristik sedimen yang akan masuk ke saluran irigasi. Tidak akuratnya data yang digunakan untuk perencanaan dapat menyebabkan BPS yang dibangun tidak efektif, sehingga bangunan yang dibuat mempunyai ukuran lebih atau kurang besar dan pada akhirnya dapat merugikan secara ekonomi.
3. Penelitian dapat dikembangkan guna keperluan yang lebih luas khususnya untuk pedoman perencanaan BPS secara umum.

DAFTAR PUSTAKA

Anonimous, 1999, "*Analisa Sedimen dan Koefisien Run Off Kali comal dan kali Bodri*", Laporan Akhir, Puslitbang Pengairan, Bandung.

Anonimous, tth, "*Instruction Manual for Miniature current Meter, Model OSS PCI*", Hydrologycal Services PTY. LTD., Liverpool N.S.W., Australia.

Anonimous, 1986, "*Kriteria Perencanaan (KP-02)*", Bangunan Utama, Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jendral Pengairan.

Anonimous, 1993, "*Reservoir Sedimentation*", Kursus Sabo Engineering, STC, Yogyakarta.

Anonimous, 1978, "*Design of small Canal structures*", a Water Resources Technical publication, USBR, Denver, Colorado.

Anonimous, 1974, "*Design of small Dams*", a Water Resources Technical publication, USBR, Oxford & IBH Publishing Co, Calcutta.

Bos, M.G., 1978, "*Discharge Measurement Structures*", International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.

Brune, G.N, 1953, "*Trap Efficiency of Reservoirs*", *Transaction of the American Geophysical Union*, Vol. 34, no. 3.

Caughran, G.W., 1976, "Location and Design of Stream Gauging Stations", UNDP, Insitute of Hydraulic Engineering, Bandung.

Caughran, G.W., 1976, "*A Primer on Hydrometri*", UNDP, Insitute of Hydraulic Engineering, Bandung.

Chin, C.O., 1985, "*Stream Bed Armauring*", University of Auckland, N.Z, Dept. of Civil Eng. Rep. No. 403.

Chow, V.T., 1992, "*Hidrolika Saluran Terbuka*" (Terjemahan), Penerbit Erlangga, Jakarta.

Dake, J.M.K., 1985, "*Hidrolika Teknik*" (Terjemahan), Edisi kedua, penerbit Erlangga, Jakarta.

Einstein, H.A, 1964, "*Sedimentation Part II: River Sedimentation*", New York, McGraw-Hill.

Flaxman, Rarga, R., 1977, "*Sedimentaion, USLE*", Washington.

French, R. H., 1985, *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill Book Company, New York.

UPT-PUSTAK-UNDIP

- Garde, Rarga, R., 1977, "*Mechanics of Sediment Transport at Alluvial Stream Problem*", Willy Limited, New Delhi.
- Gracia Widyakarsa, PT, 1996, "*Survai Pembangunan dan Rehabilitasi Jaringan Irigasi Paket I*", Desain Note Final DI Penggaron Kanan, PIJT, Semarang.
- Guy, H.P., 1969, "*Laboratory Theory and Method for Sediment Analysis*", Book 5, Chap CL, USGS, Washington.
- Guy, H.P., 1970, "*Fluvial Sediment Concept*", Book 5, Chap CL, USGS, Washington.
- Guy, H.P., 1982, "*Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment*", Book 3, Chap C3, USGS, Washington.
- Hariandja, B., 1987, "*Konsep-konsep Probabilitas dalam Perencanaan dan Perancangan Rekayasa (Terjemahan)*", Erlangga, Jakarta.
- Horst, L., 1981, "*Hydrometry, International Institue for Hydraulics and environmental Engineering*", Delft, Netherlands.
- Ilyas, M.A. dan Mayo Kayo, S., 1990, "*Beberapa Aspek Dalam Angkutan Sedimen di Sungai dan Waduk*", HATHI, Yogyakarta.
- Indah Karya, PT, 1986, "*The Detailed Design of Kedung Ombo Irrigation System*", Design Report, Volume 4, Klambu Barrage and Appurtenant Works.
- Julien, P.Y, 1995, "*Erosion and Sedimentation*", 1st ed. New York : Cambridge University.
- Kodoatie, Robert J., 2000, "*Hidrolika Saluran Terbuka*", Andi Offset, Yogyakarta.
- Linsley, 1972, "*Water Resources Engineering*", 2nd ed. New York : Mc.Graw-Hill.
- Mardjikoen, P., 1987, "*Angkutan Sedimen*", Yogyakarta : PAU Ilmu Teknik Universitas Gajah Mada.
- Memed, M., tth, "*Konstruksi Cara-Cara untuk Mengurangi angkutan Sedimen yang akan Masuk ke Intake dan Saluran Pengairan*".
- Nemec, 1970, "*Engineering Hydrology*", Mc.Graw-Hill, New York.
- Orvis and Pemberton, E.L., 1986, "*Sediment Load and Bed Load*", USBR, Denver.
- Orvis and Pemberton, E.L., 1986, "*Reservoir Sediment Distribution*", USBR, Denver.
- Poterfield, George, 1978, "*Computation of Fluvial Sediment*", Book 3 Chap. C3, USGS, Washington.
- Riggs, H. C., 1977, "*Some Statistical Tools in Hydrology*", Book 4 Chap. A1, USGS, Washington.

Rijn, L.C., 1987, "*Mathematical Modelling of Morphological Processes in The Case of Suspended Sediment Transport*", Delft Hydraulics Communication No. 382, Delft Hydraulics Laboratory, Delft.

Santosh, K. G., 1977, "*Water Resources and Hydrology*", New Delhi, Khana Publisher.

Simon, D.B. and Sentruk, F., 1992, "*Sediment Transport Technology, Water and sediment Dynamics*", Water Resources Publication, Lattleton.

Simon, D.B. and Sentruk, F., 1977, "*Sediment Transport Technology*", Water Resources Publication Fort Collins, Colorado, USA.

Soekarno, I. Strand, R.I., 1979, "*Sedimentation - Design of Small Dams*", 2nd ed. New Delhi : Oxford & IBH Publishing Co.

Soewarno, 1991, "*Hidrologi, Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri)*", Penerbit Nova, Bandung.

Soewarno, 1995, "*Hidrologi, Aplikasi Metode Statistik untuk Analisis Data, Jilid 2*", Penerbit Nova, Bandung.

Steven, Bruk, 1985, "*Method of Computing Sedimentation*", USBR, Denver.

Surin, S., 1983, "*Suspended sediment and Bed Material Sampler*", Seatec, IHE, Bandung.

Susilo, E., 2001, "*Kajian Efisiensi Tangkapan sedimen pada Beberapa Waduk di Jawa*", Tesis S2, UNDIP, Semarang.

Travaglio, M., 1980, "*Bed Load Measurement and Sampling*", DPMA, Bandung.

Travaglio, M., 1981, "*Suspended Load Measurement and Sampling*", DPMA, Bandung.

Travaglio, M., 1981, "*Computation of Fluvial Suspended Sediment Discharge*", DPMA, Bandung.

Travaglio, M., 1981, "*Bed-Material Load*", DPMA, Bandung.

Triatmodjo, B., 1992, "*Mekanika Fluida dan hidrolika*", Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Yalin, M.S., 1972, "*Mechanics of Sediment Transport*", Pergamon Press, New York.

Yang, C.T., 1996, "*Sediment Transport Theory and Practice*", Singapore, McGraw-Hill.

Word Meteorological Organisation, 1989, "*Manual on Operational Methods for The Measurement of Sediment Transport*", WMO No. 686, Geneva, Switzerland.